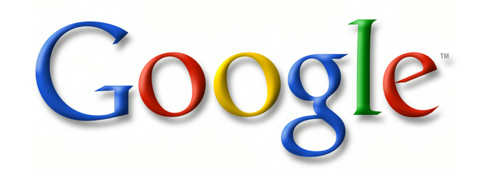
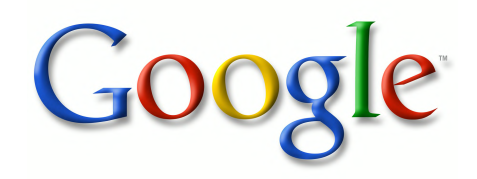
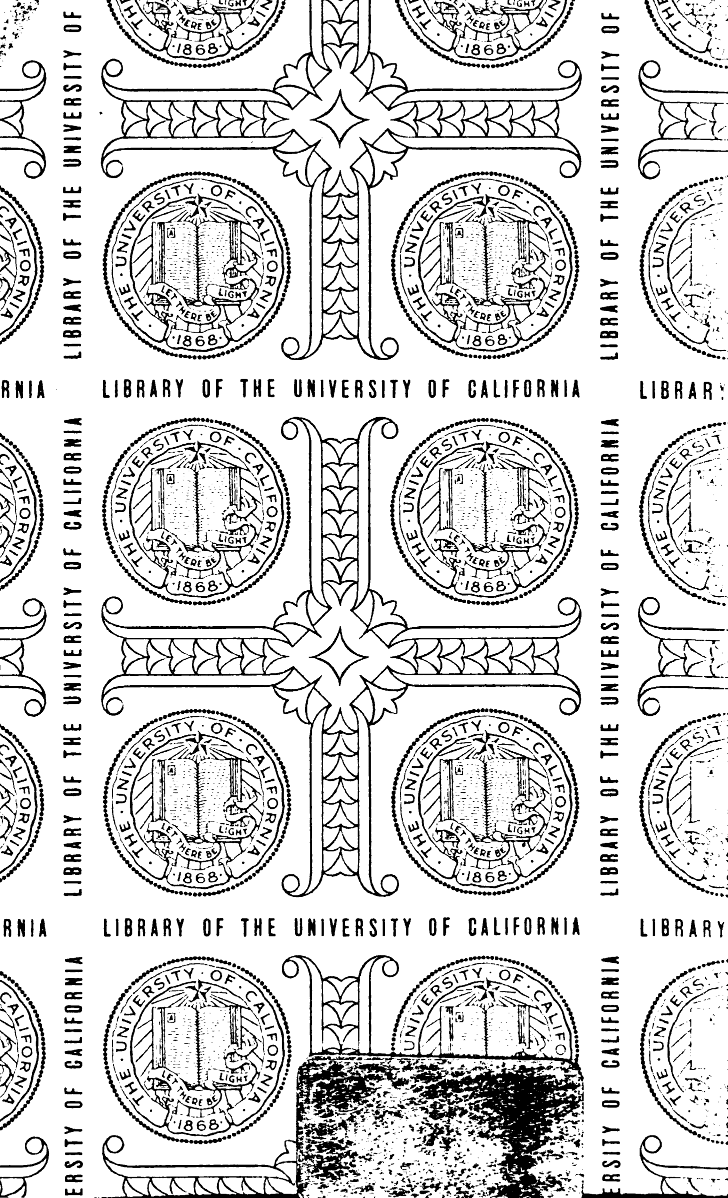
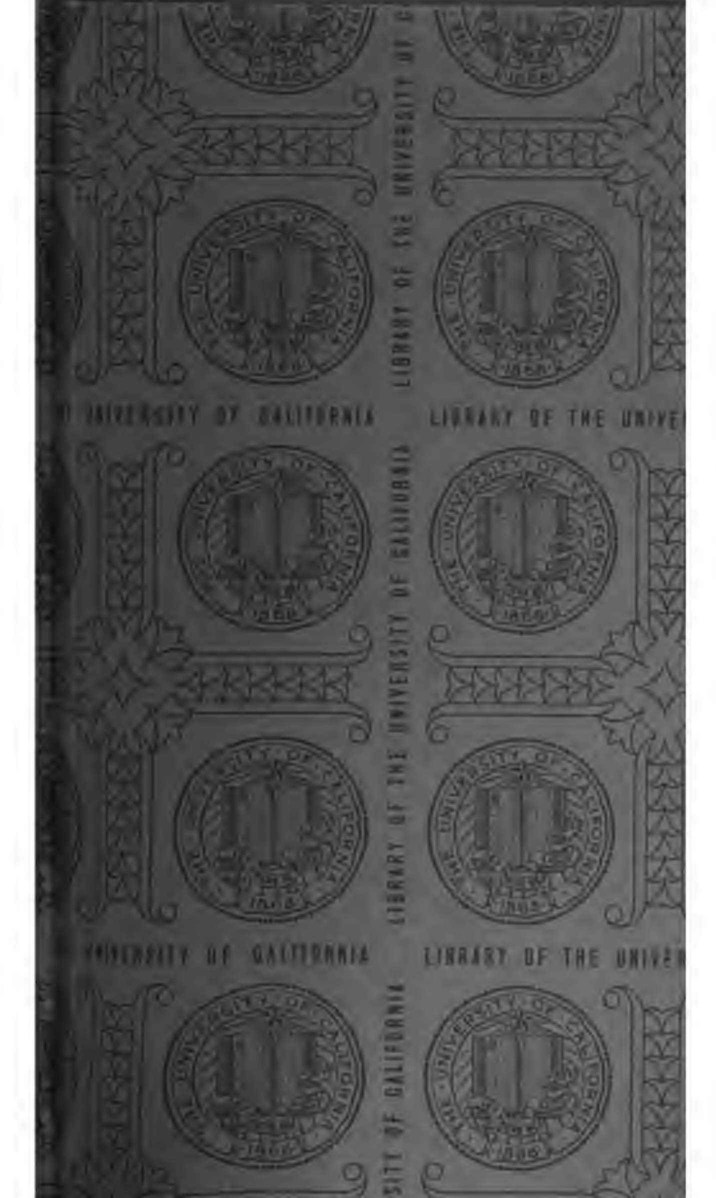



Google


LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA
LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA
THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA
LET THERE BE LIGHT
1868


LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

5

J. M. Humphrey —
Gerlach Nev 5/26/28.

Paz
Conmigo
Nunca
Vio
y la
Guerra
Siempre
Deseo.



La Science Moderne

et son état actuel

Bibliothèque de Philosophie scientifique

LA

Science Moderne

et son état actuel

PAR

ÉMILE PICARD

MEMBRE DE L'INSTITUT

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS



PARIS

ERNEST FLAMMARION, ÉDITEUR

26, RUE RACINE, 26

1921

LA SCIENCE MODERNE

ET SON ÉTAT ACTUEL

INTRODUCTION

LA SCIENCE ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

I

De très bonne heure, l'humanité dut compter des esprits plus attentifs que leurs congénères à l'observation des phénomènes courants : ce furent les premiers savants. Ils ont allumé les premiers feux et enseigné à fabriquer les instruments des âges préhistoriques. Un certain sentiment de curiosité désintéressée se mêlait-il aux buts pratiques qu'ils voulaient atteindre? On pourrait discuter là-dessus, comme le font certains archéologues sur l'art des populations des cavernes, où on trouve des artistes capables de dessiner et de peindre d'un trait si sûr les mouvements des animaux familiers. S'il est vrai que, dans ces temps reculés, l'art a toujours été surajouté à l'utile, il en a sans doute été de même de l'effort

qui avait seulement pour but de satisfaire un vague sentiment de curiosité. Mais ce que nous pouvons présumer de la science préhistorique se réduira toujours à peu de chose, et c'est avec les anciennes civilisations de la Chaldée et de l'Égypte que commence l'histoire de la science. La géométrie semble y avoir eu un caractère expérimental. On enseignait à Babylone que le côté de l'hexagone régulier est égal au rayon; c'était là sans doute un fait d'observation. Il a été l'origine de l'importance qu'a prise le nombre soixante correspondant à la sixième partie de la circonférence partagée en trois cent soixante degrés, ce dernier nombre répondant à la durée de l'année évaluée grossièrement à trois cent soixante jours.

La géométrie cultivée sur les bords du Nil n'était peut-être pas moins expérimentale. Les arpenteurs de Thèbes savaient qu'un triangle dont les côtés sont proportionnels à trois, quatre et cinq est rectangle, et c'est en utilisant cette propriété qu'ils élevaient des perpendiculaires. Ainsi la géométrie égyptienne apparaît aux historiens de la science comme un ensemble de règles pratiques, dont l'origine est d'ailleurs parfois difficile à deviner, comme il arrive pour le carré de seize neuvièmes qui représentait, d'après un papyrus de la dix-huitième dynastie, le rapport de la circonférence au diamètre. Ne méprisons pas toutefois cette mathématique que l'on a appelée préscientifique, sous prétexte qu'elle n'avait qu'un but utilitaire. D'abord, il ne me paraît guère possible qu'elle n'ait eu ses parties théoriques, quoiqu'on

ne puisse fournir à ce sujet aucun témoignage précis, et ensuite les faits mathématiques et astronomiques, dont la connaissance est due aux Égyptiens et aux Chaldéens, ont été le point de départ indispensable pour les spéculations ultérieures.

Si on veut trouver une science plus spéculative et des vues générales sur l'Univers, il faut les chercher dans les sanctuaires où s'élaboraient des cosmogonies qui furent, dans leur temps, de véritables théories scientifiques. L'action des dieux et des esprits y remplace sans doute les forces naturelles, mais il serait injuste de ne pas reconnaître l'effort de coordination et de sélection dont elles témoignent. A la place des esprits innombrables qui, pour l'homme préhistorique, comme pour le sauvage moderne, peuplaient le monde, un nombre relativement restreint de principes divins est intervenu. Et ce travail de simplification a un caractère scientifique. Ces cosmogonies qui, une fois invariablement fixées, devaient être ensuite, au moins dans certaines religions, un embarras pour le développement ultérieur de la pensée scientifique, ont constitué à leurs débuts un réel progrès.

On fait généralement honneur aux Grecs d'avoir créé la science rationnelle et désintéressée : c'est le miracle grec dont aimait à parler Ernest Renan. Nous croyons moins aujourd'hui à ces discontinuités. Qu'il s'agisse d'art ou de science, l'étude des temps plus récents nous a habitués à l'idée d'une len évolution, et il en a été sans doute en Grèce pour science comme pour l'art. Quand les physicie

d'Ionie spéculaient sur les principes des choses, ils continuaient le travail de simplification et de réduction dont les religions orientales et surtout la religion égyptienne nous donnent des exemples. Car il ne faut pas oublier qu'il y avait dans ces vieilles cosmogonies des forces auxquelles les dieux mêmes étaient soumis, et nous pouvons nous représenter Thalès de Milet et surtout Anaximandre et Anaximène comme achevant une laïcisation commencée bien des siècles auparavant.

Elles n'en marquent pas moins une date dans l'histoire de l'esprit humain, ces spéculations à la fois ambitieuses et naïves, où tout est ramené à une substance unique, et où le mouvement apparaît comme un facteur essentiel; la science grecque à ses débuts eut toutes les audaces. Avec un peu d'effort, on a pu retrouver chez les premiers penseurs de la Grèce des pressentiments de quelques principes généraux de la science moderne, mais il convient de ne pas exagérer de tels rapprochements qui sont superficiels. Le point capital à noter est que la science rationnelle, dès ses premiers pas, cherche une explication de tous les phénomènes naturels en partant d'un petit nombre de principes. Si prématurée que fût une telle tentative, un but apparaissait dont la vision devait exercer, indirectement au moins, une grande influence sur le développement de la science positive.

Le merveilleux effort pris chez les Grecs par les sciences mathématiques eut une importance plus grande encore. Au nom de Pythagore se rattache

l'explication de toutes choses par les nombres, et une formule célèbre de l'école pythagoricienne, qui était toute une métaphysique, était que « les choses sont nombres ». Avec Pythagore et ses successeurs, la géométrie se constitue définitivement comme une science rationnelle, partant d'un certain nombre de concepts, de définitions et d'axiomes, et se développant d'une manière purement logique. Ses progrès incessants pendant plusieurs siècles en firent le type idéal de la science, où tout est d'une intelligibilité parfaite, ce qui faisait écrire à Platon, sur la porte de son école : « Que personne n'entre ici, s'il n'est géomètre ». Pour les Grecs, la réalité sensible n'est qu'une réalité incomplète; ils croient à une réalité intelligible plus réelle encore et qui ne change pas : tel est, en particulier le monde des formes géométriques. Il importe toutefois de remarquer que cette science idéale de la géométrie, étudiant des objets rationnellement construits, ne perd pas contact avec l'intuition spatiale d'où elle tire toutes ses conceptions. Il paraissait donc naturel que l'instrument mathématique pût être utilisé pour une connaissance générale de l'Univers, le réel étant en quelque sorte le monde sensible vu à travers les concepts de l'arithmétique et de la géométrie. Il suffit de rappeler ici les spéculations pytagoriciennes et platoniciennes sur la musique et les phénomènes célestes, suivies plus tard des systèmes astronomiques d'Hipparque et de Ptolémée. Ainsi, sous l'influence d'un esprit épris de clarté et simplifiant tout pour tout comprendre, la science positive tendait à prendre

forme mathématique. Cette tendance n'a fait que s'accroître avec le temps, et nous aurons à dire dans quelle mesure elle nous apparaît aujourd'hui comme légitime.

Dans la philosophie et la science hellènes, simplicité, intelligibilité et vérité se montrent indissolublement liées. Il faut y joindre la beauté, le plus bel arrangement des choses étant aussi d'après les Pythagoriciens, le plus vrai. La physique et la cosmologie des Grecs furent œuvre non seulement de savants, mais aussi d'artistes et de poètes. Leur science à bien des égards est donc très loin de la nôtre; nous aurons toutefois l'occasion de rencontrer plus d'un point de contact avec l'esprit grec dans le maniement de nos théories et de nos hypothèses.

Dans ces vues rapides, nous n'avons pas voulu faire une esquisse de l'histoire de la science antique. C'est ainsi que nous n'avons pas parlé de la science expérimentale. Si les Grecs ont peu expérimenté, il y eut parmi eux d'excellents observateurs, comme en témoignent assez l'œuvre immense d'Aristote en zoologie et antérieurement les fines observations d'Hippocrate. Mais il n'en reste pas moins vrai que les mathématiques ont été pour le génie hellène la science par excellence; c'est dans ce domaine que la Grèce fit surtout œuvre scientifique durable. Depuis le temps de Pythagore, ses écoles géométriques sont restées célèbres, ne se bornant pas à l'étude des propriétés des figures, mais cultivant une algèbre géométrique dans laquelle on

raisonnait non sur les nombres, mais sur les grandeurs. En même temps se développait une arithmétique géométrique, et une des phases les plus intéressantes de son développement fut le conflit qui, chez les Pythagoriciens, s'éleva à ce sujet entre le nombre et la grandeur, à propos des incommensurables. Plus tard, les procédés d'exhaustion que l'on trouve dans Eudoxe et dans Euclide appartiennent déjà au calcul intégral, et le plus grand géomètre de l'antiquité, Archimède, doit compter parmi les fondateurs du calcul infinitésimal. La science positive paraît, vers cette époque, se désintéresser peu à peu des théories philosophiques. Rien ne nous fait connaître, sur ce sujet, les opinions d'Archimède, mais ses profondes études sur la mécanique nous le montrent préoccupé des applications pratiques qu'avait longtemps dédaignées un amour ardent pour les spéculations métaphysiques. Avec Ératosthène et Hipparque, les applications de la géométrie à l'astronomie prirent le plus brillant essor; déjà auparavant, dès le milieu du IIIe siècle avant notre ère, Aristarque de Samos avait édifié sur le système du monde l'hypothèse abandonnée après lui de la rotation de la terre autour du soleil, que Copernic devait reprendre seulement dix-huit siècles plus tard.

II

Cette excursion à travers l'antiquité depuis les plus anciens âges, a mis en évidence les tendances

pratiques et théoriques qui de bonne heure se sont développées relativement à l'objet même de la science. Si nous voulions continuer cette revue, nous les retrouverions jusqu'à nos jours; et, pour ne prendre qu'un exemple, de même que Pythagore disait que les choses sont nombres, Descartes affirme que l'étendue est l'essence des choses matérielles.

Aujourd'hui encore, ces divers points de vue théoriques et pratiques concourent à former l'opinion que l'homme, une fois acquis un certain degré de culture, se fait de la science. Comme le dit Montaigne, « c'est un grand ornement que la science », et il ajoute aussitôt, « c'est un outil de merveilleux service », c'est-à-dire que le beau et l'utile s'y rejoignent et sont inséparables. Il y faut joindre encore notre naturelle curiosité et le désir de connaître le vrai. Mais ces divers éléments peuvent se juxtaposer à des degrés variables, et il s'en faut que les mêmes mots soient entendus par tous de la même façon. Ainsi, nous l'avons déjà dit, les idées du beau et du simple ont pu partiellement au moins recouvrir l'idée du vrai pour quelques penseurs de la Grèce. Nous devons donc nous attendre à rencontrer chez les savants et chez les esprits philosophiques des opinions très diverses sur l'objet de la science et sur sa valeur : de plus, dans les différentes sciences particulières, la variété des problèmes et ·s méthodes concourt encore à accroître cette ɔrsité. Sans nous astreindre à des classifications, ɔurs insuffisantes dans leur rigidité, nous allons

jeter un coup d'œil sur les principales tendances qui se manifestent à notre époque quant au but et à la valeur de la Science.

On doit tout d'abord reconnaître que l'importance prise par la science dans nos sociétés modernes provient avant tout des services incomparables qu'elle rend à l'humanité. Le plus grand nombre considère, suivant le mot de Bacon, que la science et la puissance humaines se correspondent et vont au même but. Il admire surtout dans la science le merveilleux spectacle des applications si variées qui ont tant modifié les conditions d'existence des peuples civilisés : c'est un genre de valeur aisément appréciable. Il y a même un danger dans ces constatations trop faciles, car on n'a qu'une vue très incomplète, si on ne se rend compte des rapports qui existent entre ces brillantes manifestations de l'activité humaine et la science théorique et désintéressée. Les idées théoriques ont été souvent le germe fécond d'où sont sortis d'importants progrès dans l'industrie, dans l'agriculture, dans la médecine. Les rêveurs scientifiques, qui semblent perdus dans leurs spéculations, sont à leur manière des hommes pratiques : l'application vient quelquefois par surcroît. La source tarirait promptement si un esprit exclusivement utilitaire venait à dominer dans nos sociétés trop préoccupées de jouissances immédiates. L'histoire des sciences montre combien cette dépendance a toujours été intime entre la science pure et les applications. Ces influences réciproques ont agi dans l'un et l'autre sens, la pratique conduisant

pratiques et théoriques qui de bonne heure se sont développées relativement à l'objet même de la science. Si nous voulions continuer cette revue, nous les retrouverions jusqu'à nos jours; et, pour ne prendre qu'un exemple, de même que Pythagore disait que les choses sont nombres, Descartes affirme que l'étendue est l'essence des choses matérielles.

Aujourd'hui encore, ces divers points de vue théoriques et pratiques concourent à former l'opinion que l'homme, une fois acquis un certain degré de culture, se fait de la science. Comme le dit Montaigne, « c'est un grand ornement que la science », et il ajoute aussitôt, « c'est un outil de merveilleux service », c'est-à-dire que le beau et l'utile s'y rejoignent et sont inséparables. Il y faut joindre encore notre naturelle curiosité et le désir de connaître le vrai. Mais ces divers éléments peuvent se juxtaposer à des degrés variables, et il s'en faut que les mêmes mots soient entendus par tous de la même façon. Ainsi, nous l'avons déjà dit, les idées du beau et du simple ont pu partiellement au moins recouvrir l'idée du vrai pour quelques penseurs de la Grèce. Nous devons donc nous attendre à rencontrer chez les savants et chez les esprits philosophiques des opinions très diverses sur l'objet de la science et sur sa valeur : de plus, dans les différentes sciences particulières, la variété des problèmes et des méthodes concourt encore à accroître cette diversité. Sans nous astreindre à des classifications, toujours insuffisantes dans leur rigidité, nous allons

jeter un coup d'œil sur les principales tendances qui se manifestent à notre époque quant au but et à la valeur de la Science.

On doit tout d'abord reconnaître que l'importance prise par la science dans nos sociétés modernes provient avant tout des services incomparables qu'elle rend à l'humanité. Le plus grand nombre considère, suivant le mot de Bacon, que la science et la puissance humaines se correspondent et vont au même but. Il admire surtout dans la science le merveilleux spectacle des applications si variées qui ont tant modifié les conditions d'existence des peuples civilisés : c'est un genre de valeur aisément appréciable. Il y a même un danger dans ces constatations trop faciles, car on n'a qu'une vue très incomplète, si on ne se rend compte des rapports qui existent entre ces brillantes manifestations de l'activité humaine et la science théorique et désintéressée. Les idées théoriques ont été souvent le germe fécond d'où sont sortis d'importants progrès dans l'industrie, dans l'agriculture, dans la médecine. Les rêveurs scientifiques, qui semblent perdus dans leurs spéculations, sont à leur manière des hommes pratiques : l'application vient quelquefois par surcroît. La source tarirait promptement si un esprit exclusivement utilitaire venait à dominer dans nos sociétés trop préoccupées de jouissances immédiates. L'histoire des sciences montre combien cette dépendance a toujours été intime entre la science pure et les applications. Ces influences réciproques ont agi dans l'un et l'autre sens, la pratique conduisant

qui avait seulement pour but de satisfaire un vague sentiment de curiosité. Mais ce que nous pouvons présumer de la science préhistorique se réduira toujours à peu de chose, et c'est avec les anciennes civilisations de la Chaldée et de l'Égypte que commence l'histoire de la science. La géométrie semble y avoir eu un caractère expérimental. On enseignait à Babylone que le côté de l'hexagone régulier est égal au rayon; c'était là sans doute un fait d'observation. Il a été l'origine de l'importance qu'a prise le nombre soixante correspondant à la sixième partie de la circonférence partagée en trois cent soixante degrés, ce dernier nombre répondant à la durée de l'année évaluée grossièrement à trois cent soixante jours.

La géométrie cultivée sur les bords du Nil n'était peut-être pas moins expérimentale. Les arpenteurs de Thèbes savaient qu'un triangle dont les côtés sont proportionnels à trois, quatre et cinq est rectangle, et c'est en utilisant cette propriété qu'ils élevaient des perpendiculaires. Ainsi la géométrie égyptienne apparaît aux historiens de la science comme un ensemble de règles pratiques, dont l'origine est d'ailleurs parfois difficile à deviner, comme il arrive pour le carré de seize neuvièmes qui représentait, d'après un papyrus de la dix-huitième dynastie, le rapport de la circonférence au diamètre. Ne méprisons pas toutefois cette mathématique que l'on a appelée préscientifique, sous prétexte qu'elle n'avait qu'un but utilitaire. D'abord, il ne me paraît guère possible qu'elle n'ait eu ses parties théoriques, quoiqu'on

ne puisse fournir à ce sujet aucun témoignage précis, et ensuite les faits mathématiques et astronomiques, dont la connaissance est due aux Égyptiens et aux Chaldéens, ont été le point de départ indispensable pour les spéculations ultérieures.

Si on veut trouver une science plus spéculative et des vues générales sur l'Univers, il faut les chercher dans les sanctuaires où s'élaboraient des cosmogonies qui furent, dans leur temps, de véritables théories scientifiques. L'action des dieux et des esprits y remplace sans doute les forces naturelles, mais il serait injuste de ne pas reconnaître l'effort de coordination et de sélection dont elles témoignent. A la place des esprits innombrables qui, pour l'homme préhistorique, comme pour le sauvage moderne, peuplaient le monde, un nombre relativement restreint de principes divins est intervenu. Et ce travail de simplification a un caractère scientifique. Ces cosmogonies qui, une fois invariablement fixées, devaient être ensuite, au moins dans certaines religions, un embarras pour le développement ultérieur de la pensée scientifique, ont constitué à leurs débuts un réel progrès.

On fait généralement honneur aux Grecs d'avoir créé la science rationnelle et désintéressée : c'est le miracle grec dont aimait à parler Ernest Renan. Nous croyons moins aujourd'hui à ces discontinuités. Qu'il s'agisse d'art ou de science, l'étude des temps plus récents nous a habitués à l'idée d'une lente évolution, et il en a été sans doute en Grèce pour la science comme pour l'art. Quand les physiciens

d'Ionie spéculaient sur les principes des choses, ils continuaient le travail de simplification et de réduction dont les religions orientales et surtout la religion égyptienne nous donnent des exemples. Car il ne faut pas oublier qu'il y avait dans ces vieilles cosmogonies des forces auxquelles les dieux mêmes étaient soumis, et nous pouvons nous représenter Thalès de Milet et surtout Anaximandre et Anaximène comme achevant une laïcisation commencée bien des siècles auparavant.

Elles n'en marquent pas moins une date dans l'histoire de l'esprit humain, ces spéculations à la fois ambitieuses et naïves, où tout est ramené à une substance unique, et où le mouvement apparaît comme un facteur essentiel; la science grecque à ses débuts eut toutes les audaces. Avec un peu d'effort, on a pu retrouver chez les premiers penseurs de la Grèce des pressentiments de quelques principes généraux de la science moderne, mais il convient de ne pas exagérer de tels rapprochements qui sont superficiels. Le point capital à noter est que la science rationnelle, dès ses premiers pas, cherche une explication de tous les phénomènes naturels en partant d'un petit nombre de principes. Si prématurée que fût une telle tentative, un but apparaissait dont la vision devait exercer, indirectement au moins, une grande influence sur le développement de la science positive.

Le merveilleux effort pris chez les Grecs par les sciences mathématiques eut une importance plus grande encore. Au nom de Pythagore se rattache

l'explication de toutes choses par les nombres, et une formule célèbre de l'école pythagoricienne, qui était toute une métaphysique, était que « les choses sont nombres ». Avec Pythagore et ses successeurs, la géométrie se constitue définitivement comme une science rationnelle, partant d'un certain nombre de concepts, de définitions et d'axiomes, et se développant d'une manière purement logique. Ses progrès incessants pendant plusieurs siècles en firent le type idéal de la science, où tout est d'une intelligibilité parfaite, ce qui faisait écrire à Platon, sur la porte de son école : « Que personne n'entre ici, s'il n'est géomètre ». Pour les Grecs, la réalité sensible n'est qu'une réalité incomplète; ils croient à une réalité intelligible plus réelle encore et qui ne change pas : tel est, en particulier le monde des formes géométriques. Il importe toutefois de remarquer que cette science idéale de la géométrie, étudiant des objets rationnellement construits, ne perd pas contact avec l'intuition spatiale d'où elle tire toutes ses conceptions. Il paraissait donc naturel que l'instrument mathématique pût être utilisé pour une connaissance générale de l'Univers, le réel étant en quelque sorte le monde sensible vu à travers les concepts de l'arithmétique et de la géométrie. Il suffit de rappeler ici les spéculations pytagoriciennes et platoniciennes sur la musique et les phénomènes célestes, suivies plus tard des systèmes astronomiques d'Hipparque et de Ptolémée. Ainsi, sous l'influence d'un esprit épris de clarté et simplifiant tout pour tout comprendre, la science positive tendait à prendre la

forme mathématique. Cette tendance n'a fait que s'accroître avec le temps, et nous aurons à dire dans quelle mesure elle nous apparaît aujourd'hui comme légitime.

Dans la philosophie et la science hellènes, simplicité, intelligibilité et vérité se montrent indissolublement liées. Il faut y joindre la beauté, le plus bel arrangement des choses étant aussi d'après les Pythagoriciens, le plus vrai. La physique et la cosmologie des Grecs furent œuvre non seulement de savants, mais aussi d'artistes et de poètes. Leur science à bien des égards est donc très loin de la nôtre; nous aurons toutefois l'occasion de rencontrer plus d'un point de contact avec l'esprit grec dans le maniement de nos théories et de nos hypothèses.

Dans ces vues rapides, nous n'avons pas voulu faire une esquisse de l'histoire de la science antique. C'est ainsi que nous n'avons pas parlé de la science expérimentale. Si les Grecs ont peu expérimenté, il y eut parmi eux d'excellents observateurs, comme en témoignent assez l'œuvre immense d'Aristote en zoologie et antérieurement les fines observations d'Hippocrate. Mais il n'en reste pas moins vrai que les mathématiques ont été pour le génie hellène la science par excellence; c'est dans ce domaine que la Grèce fit surtout œuvre scientifique durable. Depuis le temps de Pythagore, ses écoles géométriques sont restées célèbres, ne se bornant pas à l'étude des propriétés des figures, mais cultivant aussi une algèbre géométrique dans laquelle on

raisonnait non sur les nombres, mais sur les grandeurs. En même temps se développait une arithmétique géométrique, et une des phases les plus intéressantes de son développement fut le conflit qui, chez les Pythagoriciens, s'éleva à ce sujet entre le nombre et la grandeur, à propos des incommensurables. Plus tard, les procédés d'exhaustion que l'on trouve dans Eudoxe et dans Euclide appartiennent déjà au calcul intégral, et le plus grand géomètre de l'antiquité, Archimède, doit compter parmi les fondateurs du calcul infinitésimal. La science positive paraît, vers cette époque, se désintéresser peu à peu des théories philosophiques. Rien ne nous fait connaître, sur ce sujet, les opinions d'Archimède, mais ses profondes études sur la mécanique nous le montrent préoccupé des applications pratiques qu'avait longtemps dédaignées un amour ardent pour les spéculations métaphysiques. Avec Ératosthène et Hipparque, les applications de la géométrie à l'astronomie prirent le plus brillant essor; déjà auparavant, dès le milieu du IIIe siècle avant notre ère, Aristarque de Samos avait édifié sur le système du monde l'hypothèse abandonnée après lui de la rotation de la terre autour du soleil, que Copernic devait reprendre seulement dix-huit siècles plus tard.

II

Cette excursion à travers l'antiquité depuis les plus anciens âges, a mis en évidence les tendances

pratiques et théoriques qui de bonne heure se sont développées relativement à l'objet même de la science. Si nous voulions continuer cette revue, nous les retrouverions jusqu'à nos jours ; et, pour ne prendre qu'un exemple, de même que Pythagore disait que les choses sont nombres, Descartes affirme que l'étendue est l'essence des choses matérielles.

Aujourd'hui encore, ces divers points de vue théoriques et pratiques concourent à former l'opinion que l'homme, une fois acquis un certain degré de culture, se fait de la science. Comme le dit Montaigne, « c'est un grand ornement que la science », et il ajoute aussitôt, « c'est un outil de merveilleux service », c'est-à-dire que le beau et l'utile s'y rejoignent et sont inséparables. Il y faut joindre encore notre naturelle curiosité et le désir de connaître le vrai. Mais ces divers éléments peuvent se juxtaposer à des degrés variables, et il s'en faut que les mêmes mots soient entendus par tous de la même façon. Ainsi, nous l'avons déjà dit, les idées du beau et du simple ont pu partiellement au moins recouvrir l'idée du vrai pour quelques penseurs de la Grèce. Nous devons donc nous attendre à rencontrer chez les savants et chez les esprits philosophiques des opinions très diverses sur l'objet de la science et sur sa valeur : de plus, dans les différentes sciences particulières, la variété des problèmes et des méthodes concourt encore à accroître cette diversité. Sans nous astreindre à des classifications, toujours insuffisantes dans leur rigidité, nous allons

jeter un coup d'œil sur les principales tendances qui se manifestent à notre époque quant au but et à la valeur de la Science.

On doit tout d'abord reconnaître que l'importance prise par la science dans nos sociétés modernes provient avant tout des services incomparables qu'elle rend à l'humanité. Le plus grand nombre considère, suivant le mot de Bacon, que la science et la puissance humaines se correspondent et vont au même but. Il admire surtout dans la science le merveilleux spectacle des applications si variées qui ont tant modifié les conditions d'existence des peuples civilisés : c'est un genre de valeur aisément appréciable. Il y a même un danger dans ces constatations trop faciles, car on n'a qu'une vue très incomplète, si on ne se rend compte des rapports qui existent entre ces brillantes manifestations de l'activité humaine et la science théorique et désintéressée. Les idées théoriques ont été souvent le germe fécond d'où sont sortis d'importants progrès dans l'industrie, dans l'agriculture, dans la médecine. Les rêveurs scientifiques, qui semblent perdus dans leurs spéculations, sont à leur manière des hommes pratiques : l'application vient quelquefois par surcroît. La source tarirait promptement si un esprit exclusivement utilitaire venait à dominer dans nos sociétés trop préoccupées de jouissances immédiates. L'histoire des sciences montre combien cette dépendance a toujours été intime entre la science pure et les applications. Ces influences réciproques ont agi dans l'un et l'autre sens, la pratique conduisant

ici à la spéculation, tandis que des vues théoriques ont été ailleurs l'origine de recherches pratiques. Il suffit de rappeler quelques exemples. Dans son immortel ouvrage sur la puissance motrice du feu, Sadi Carnot en se proposant d'expliquer et d'étendre les services que peuvent rendre les machines à feu a créé la thermodynamique, d'où est née l'énergétique moderne. De même les recherches de Sainte-Claire-Deville sur le platine ont été l'origine de ses recherches sur la dissociation, d'où devait sortir la mécanique chimique. D'autre part, Newton, en écrivant le livre des *Principes de la philosophie naturelle*, ne pensait guère aux navigateurs qui devaient plus tard utiliser quelque *Connaissance des Temps* construite d'après les lois de la gravitation universelle. De même, Ampère et Faraday en étudiant les actions des courants sur les courants et les phénomènes d'induction préparaient à leur insu la voie à la construction des puissantes machines électromagnétiques dont l'emploi a révolutionné tant d'industries.

Quelle que puisse être dans chaque cas l'origine des progrès matériels réalisés par la science, celle-ci apparaît de plus en plus comme une puissance formidable qui ne recule jamais et dont les conquêtes sont définitives. Il semble que tout lui soit possible, et on doit reconnaître que les progrès accomplis depuis un siècle autorisent des espérances pour ainsi dire illimitées. Toutefois, ce tableau magnifique ne va pas sans quelques ombres; on a pu faire le procès de quelques utilités créées par la science, en lui

reprochant d'augmenter nos désirs au détriment de notre bonheur et de notre tranquillité. Sur un terrain aussi subjectif, toute discussion est impossible. Quelque part de vérité que renferment ces vues pessimistes, personne ne nie le soulagement que de bien des côtés les progrès des sciences ont apporté à l'humaine misère, et qu'ils apporteront certainement dans l'avenir en apprenant à mieux utiliser les énergies naturelles et à en découvrir de nouvelles. On peut espérer qu'ils contribueront pour une large part à la solution des problèmes sociaux qui sont une des grandes préoccupations de notre temps. De ce point de vue optimiste, la science apparaît bonne en même temps qu'utile : c'est une pensée fortifiante pour ceux qui lui consacrent leur vie.

Nous venons d'envisager la science, en quelque sorte du dehors, en considérant ses applications. C'est là, ai-je dit, le point de vue du plus grand nombre, et, à la découverte d'un phénomène ou d'un corps nouveau, il nous est arrivé à tous d'entendre demander à quoi cela pouvait servir. Cependant, il faut reconnaître que la diffusion des méthodes scientifiques modifie peu à peu la mentalité de ceux qui se piquent le moins de curiosité philosophique. L'idée profonde de loi naturelle s'implante peu à peu dans les esprits de ceux qui n'y voient d'abord qu'une possibilité d'accroître notre puissance sur les choses et, comme on l'a dit, de commander à la nature en obéissant à ses lois. D'ailleurs, le nombre augmente de ceux pour lesquels tout point de vue utilitaire est dépassé, et que quelque partie au moins

de la science intéresse en elle-même. L'astronomie est à cet égard une des sciences les plus captivantes. L'attrait est grand de contempler quelques instants l'Univers du point de vue de Sirius, ou de se transporter plus loin encore dans ces mondes stellaires en formation qu'on appelle des nébuleuses irrésolubles, et on est presque assuré de retenir l'attention des moins curieux en parlant devant un ciel étoilé des distances immenses qui nous séparent des étoiles les plus voisines.

III

Il est temps de rechercher maintenant ce que pensent de la science ceux qui la cultivent et ont réfléchi à ses principes. La philosophie positive d'Auguste Comte a exercé une grande influence dans la seconde moitié du siècle dernier; nous en envisageons seulement le côté strictement scientifique sans en discuter l'originalité.

Les vérités scientifiques sont des vérités de l'ordre expérimental; nous constatons des faits par l'observation et l'expérience et, en rattachant de proche en proche les faits les uns aux autres par des relations immédiates, nous arrivons à des notions d'un ordre plus général qui fournissent l'explication commune d'un nombre immense de faits particuliers. A travers les circonstances indéfiniment variables de ceux-ci, nous apercevons ainsi des rapports constants, ce qui nous conduit à des lois. Telles sont, pour prendre un exemple, les lois sur la pression des gaz

et sur les tensions des vapeurs qui rendent compte d'un grand nombre d'expériences particulières. Aucune difficulté ne se présente, d'ailleurs, pour Comte quant à la notion même du réel ; comme il le dit, le mot *positif* désigne le *réel*, par opposition au *chimérique*. La doctrine comtienne, qui ne s'embarrasse d'aucune analyse délicate, paraît assurément simple, mais est singulièrement superficielle. Comte, qui se préoccupait surtout de sociologie, n'était pas un savant ; il parle, pour ainsi dire, d'une science achevée, comme en témoignent, au reste, ses prévisions malheureuses sur les bornes imposées à diverses recherches scientifiques, et sa vision statique d'une science, qu'il souhaite voir promptement définitive, est pour nous inadmissible. Taine dit quelque part de Stuart Mill qu'il s'est coupé les ailes pour fortifier les jambes ; beaucoup de savants préfèrent garder quelques ailes et pensent que le chimérique joue son rôle dans l'édification de la science. Le positivisme trop simpliste de Comte a besoin d'être élargi par une analyse plus complète. Malgré son étroitesse, il a représenté assez exactement, pendant la seconde moitié du siècle dernier, l'opinion de la majorité des savants, particulièrement de ceux qui, surtout expérimentateurs, se méfiaient des théories. Une lettre célèbre de Berthelot à Renan résume bien la doctrine, mais avec plus de largeur, car Berthelot juge nécessaire d'adjoindre à la science positive une science idéale dont les frontières avec la première sont, d'ailleurs, assez vaguement tracées, et il n'en pouvait être autrement, la science positive

présentant, comme nous allons le voir, dans sa genèse, un certain degré d'arbitraire.

Il est impossible d'approfondir davantage les questions qui se posent relativement à l'objet de la science, sans faire une analyse sommaire de l'acquisition de nos connaissances. Les seules choses dont nous ayons une connaissance certaine sont les phénomènes de conscience, variables, d'ailleurs, d'un moment à l'autre. Ils peuvent se partager en deux groupes que nous rapportons au monde extérieur et au monde intérieur. Le monde extérieur est ce qui parvient à notre conscience à travers les sens, et que notre volonté seule ne suffit pas à faire naître. Les faits de conscience, se produisant sans l'intermédiaire des organes des sens, sont rapportés au monde intérieur ; tels la pensée et le souvenir. Nous avons ainsi la notion vague d'un réel intérieur et d'un réel extérieur. Nous nous bornerons ici à cette dernière notion ; mais il importe de la préciser, car il faut tenir compte des illusions des sens. La notion du réel est pour l'homme une notion lentement acquise par une suite innombrable d'expériences, où la volonté a joué un rôle, et auxquelles ont pu concourir divers organes. C'est par ces expériences répétées que sont peu à peu éliminées les illusions des sens. De plus, dans ces expériences, la constatation de certains rapports invariables entre une première sensation et celles que nous pouvons faire naître à sa suite achève de nous donner la notion du réel. On ne peut, d'ailleurs, se borner au réel individuel. Le réel a aussi une signification sociale,

comme on dit aujourd'hui, en ce qu'il exige un consensus universel dans une humanité moyenne; il peut être différent pour les fous et les hommes d'esprit sain.

Cette analyse suffit à montrer que notre notion du réel est susceptible de corrections et d'accroissements progressifs. Elle dépend à la fois d'expériences d'une précision croissante et de constatations successives de certaines invariances ; c'est un point qu'il ne faudra pas oublier. Malgré cette mobilité, la suite d'observations ou d'expériences ayant entre elles un lien, par exemple la succession des jours et des nuits, nous familiarise de bonne heure avec l'attente de sensations consécutives bien définies, et, de l'attente à la prédiction, il n'y a pas loin. La connaissance du réel apparaît donc avec une incontestable valeur d'utilité, et, ainsi que nous l'avons déjà indiqué, l'utile et le vrai sont dans cette question extrêmement voisins. Comme l'a remarqué Helmholtz, « nous disons que nos représentations du monde extérieur sont *vraies*, quand elles nous donnent une indication suffisante des conséquences de nos actes, par rapport à ce monde extérieur, et qu'elles nous permettent de tirer des conclusions exactes sur les modifications que nous devons en attendre ».

Les observations et les expériences dont il a été question jusqu'ici sont les expériences et observations vulgaires. Si on en reste là, on se trouve seulement en présence d'un simple monceau de faits présentant quelques connexions, et cette connais-

sance brute du réel n'est pas suffisante pour fonder la science. Mais, dans nos expériences sur une certaine portion du réel extérieur, nous parvenons à distinguer certaines propriétés qui sont indépendantes de nous, et d'autres qui en dépendent. Ce sont les éléments objectifs et les éléments subjectifs. Parmi les éléments objectifs, il en est de constants qui nous donnent l'idée de la *chose* elle-même; d'autres peuvent être variables, comme la position ou le mouvement de cette chose. Quant aux éléments subjectifs, des exemples en sont fournis par la distance où nous nous trouvons d'une chose déterminée et l'angle sous lequel nous la voyons. Les distinctions dans lesquelles nous abstrayons certains éléments, pour n'en retenir que quelques-uns, forment une des opérations les plus essentielles que nous puissions faire sur nos expériences et ces abstractions nous conduisent aux concepts. Ainsi, nous formons le concept d'homme ou de matière. Ce qui précède montre assez qu'il ne faut pas attribuer à nos concepts un caractère de fixité absolue. Ils sont susceptibles d'être modifiés, soit par suite de la constatation de faits nouveaux, soit par un départ plus exact entre les éléments objectifs et les éléments subjectifs. Ajoutons que la formation des concepts présente quelque degré d'arbitraire, conséquence nécessaire d'une certaine indétermination dans le choix des éléments conservés. Nous arrivons maintenant à un point très important : les concepts jouent un rôle essentiel dans la genèse de la science, et la connaissance scientifique tend à s'effectuer au moyen

de concepts. Ce que nous avons dit de l'arbitraire, se présentant dans la formation de ceux-ci, montre le rôle que joue, dans l'édification de la science, l'esprit travaillant sur les données de l'expérience.

IV

Ces représentations mentales des faits servent de base à nos raisonnements, et nous utilisons nos concepts dans les déductions qui conduisent à des prévisions ; c'est en cela que réside essentiellement leur utilité. Nous ne voulons pas nous immiscer ici dans la lutte entre le psychologisme et la logique. On peut traiter de la genèse de la science en regardant les rapports logiques comme des données. A ce point de vue, la logique est un instrument, impuissant à créer, mais admirable pour la transformation et apte à mettre en évidence des conséquences inattendues qui pourront conduire parfois indirectement à la formation de concepts plus étendus et à des hypothèses plus générales. C'est, d'ailleurs, un outil délicat, opérant sur une réalité déjà déformée et simplifiée, et il reste toujours nécessaire de comparer les conséquences de nos déductions avec les résultats de l'observation et de l'expérience.

Nous avons plusieurs fois parlé de rapports invariables et de successions dans un ordre déterminé ; on affirme, par exemple, qu'un certain élément se trouve toujours dans une chose, si un autre élément s'y rencontre, qu'il s'agisse de relations dans le

temps ou dans l'espace. Des flots d'encre ont coulé sur le principe de causalité, mais quelle que soit la doctrine, associationniste, évolutive, intuitive, tous les efforts pour prouver la validité du principe devaient échouer. Il faut se borner à dire que l'expérience nous a rendu familières certaines liaisons et qu'elles nous a conduits à la croyance qu'il y a des lois dans la nature : « Avant de faire la science, disait Claude Bernard, il faut croire à la science ». Ajoutons qu'on a commencé à croire à la science quand on s'est rendu compte de son utilité; de plus, nous sommes encore poussés à cette croyance par un sentiment esthétique, celui de l'ordre et de l'harmonie qui se tronve nécessairement dans la notion de loi. Nous retrouvons là des idées qui se sont déjà présentées à nous sur le concours du vrai, de l'utile et du beau.

Un système de concepts, associé à des lois ou faits particuliers et transformé par des déductions convenables, de façon à faire rentrer moyennant certaines hypothèses ces lois ou faits dans des cadres plus généraux constitue une théorie scientifique. La part d'arbitraire, signalée dans la formation des concepts, est *a fortiori* plus grande encore dans la formation des théories ; elle réside principalement dans les hypothèses conduisant aux généralisations qui sont le point essentiel de la théorie. Dans les diverses sciences, le développement des théories prend des formes différentes, et même leur rôle n'est pas entendu de la même façon par tous les savants; nous en dirons un mot tout à l'heure.

D'une manière générale, on exige d'une théorie qu'elle soit simple. Il y a là une notion aussi féconde que vague; ce principe de simplicité, malgré son caractère hypothétique, tend à produire en nous un sentiment de certitude. Devant une loi simple, nous croyons moins à la possibilité d'une erreur; on peut présumer que la loi de la gravitation universelle n'aurait pas eu grand avenir, si au lieu de l'exposant *deux*, il eût fallu, comme on l'a proposé pour expliquer certaines particularités du mouvement de la planète Mercure, lui substituer le nombre *deux*, augmenté de seize unités du huitième ordre. Sans doute, comme le disait un jour Fresnel à Laplace, la nature se joue de nos difficultés analytiques, et les physiciens connaissent les relations compliquées que l'on doit substituer à la loi simple de Mariotte; mais beaucoup ne sont satisfaits que quand ils peuvent rattacher des relations complexes à quelque idée théorique simplement formulée. Quand il en est autrement, les lois sont traitées d'empiriques, ce qui peut d'abord paraître singulier, car toutes les lois proviennent directement ou indirectement de l'expérience, ce qui ne va pas sans un peu de mépris. Quoi qu'il en soit, l'esprit se laisse guider par le principe de simplicité; on a ainsi une première approximation dans la genèse de la science.

Toute théorie mettant en présence des concepts, des faits expérimentaux, des hypothèses, des raisonnements, forme un amalgame dont les parties se laissent difficilement disjoindre. Aussi, en général, aucune expérience ne permet-elle d'établir

la vérité d'un élément de cet ensemble présentant un caractère hypothétique. Il arrive donc que plusieurs théories puissent se développer simultanément et rendre compte d'un même groupe de phénomènes. On peut toujours faire concorder une théorie avec l'expérience en modifiant certains concepts et en introduisant des hypothèses supplémentaires. Mais ici intervient utilement l'idée de simplicité, en nous faisant rejeter une théorie trop compliquée. C'est sans doute parce que, une telle théorie étant trop difficile à manier, nous la jugeons peu utile; peut-être aussi parce qu'elle ne nous paraît pas belle dans sa complication.

Quand nous observons un phénomène, il nous arrive de dire que nous comprenons ou que nous ne comprenons pas. Que signifie cette assertion? Nous comprenons un phénomène quand, avec nos connaissances acquises, nous aurions pu le prévoir. Notre explication consiste à développer cette possibilité de prévision. On peut, d'ailleurs, être plus ou moins exigeant quant à la nature des lois ou théories à invoquer dans une explication; ces exigences varient d'une science à l'autre, et elles ne sont pas les mêmes pour un physicien et un biologiste. Nous remontons aussi plus ou moins haut dans nos explications. Ainsi, la mécanique céleste prend pour point de départ l'attraction newtonienne, mais on peut vouloir expliquer cette attraction, sans grand succès d'ailleurs, jusqu'ici, soit en considérant les impulsions communiquées au corps par un milieu très subtil, soit en se basant

sur certaine différence entre les électricités de signes contraires. Quoi qu'il en soit, l'intelligible tout court n'a pas pour nous, comme pour les Grecs, un sens bien précis. Il y a toujours une première donnée dont il faut partir dans nos explications.

Les généralités précédentes ont mis en évidence la part importante de notre esprit dans la genèse de la science, et il est exact que nous créons notre science, ne spéculant sur les réalités extérieures qu'à travers l'ensemble des concepts et des théories. Mais celui-ci ne forme pas une armature rigide, comme les formes et les catégories de certain idéalisme. Une partie importante du progrès des sciences consiste dans une connaissance plus complète des éléments objectifs, ce qu'on exprime en disant que la science tend à devenir de plus en plus objective, et cette connaissance influe nécessairement sur la formation des concepts et de leurs groupements.

V

En faisant un examen sommaire de quelques sciences particulières, nous trouverons l'application de nos remarques générales, et nous pourrons les compléter sur quelques points. Nous avons vu qu'en Grèce la science rationnelle apparut avec la géométrie, et, depuis la Renaissance jusqu'à nos jours, les sciences de la nature ont tendu à prendre une forme mathématique. C'est qu'en effet les concepts

été conduit peu à peu à formuler des principes, dont on ne vit pas, heureusement, d'abord, toutes les difficultés d'application. Le savant admet l'existence du monde extérieur, il peut bien accepter l'idée d'un espace absolu, lieu des phénomènes de ce monde extérieur.

La notion de temps est essentielle aussi pour la mécanique; elle exprime l'idée de l'enchaînement des choses et le temps abstrait se présente dans les sciences comme une variable indépendante à laquelle nous rapportons les phénomènes. Il faut chercher sans doute, dans des faits physiologiques rapprochés d'expériences et observations convenables, l'origine de sensations de durées égales, et, par suite, les raisons pour lesquelles nous avons pu, par approximations successives, arriver à une graduation du temps. La durée de la rotation de la terre autour de son axe, répondant suffisamment aux sensations ainsi acquises, a été prise pour unité de temps, et le choix de cette unité a été capital.

Dans le développement de la mécanique, comme de toute science, des circonstances accidentelles ont joué un rôle important, et il faut noter, à cet égard, le caractère des expériences fondamentales de Galilée et de Newton sur la chute des corps. Quoique l'on connût le mouvement de la terre, on faisait abstraction de ce mouvement dans l'interprétation des expériences. Il y a là une de ces approximations fréquentes dans l'histoire de la science, où fort heureusement la petitesse des perturbations laisse un caractère simple à un phénomène com-

plexe, ce dont on ne se rend compte, d'ailleurs, qu'après coup. Le développement de la mécanique aurait été tout autre si la terre avait tourné beaucoup plus rapidement autour de son axe, les expériences sur le plan incliné se présentant alors avec une complication qui eût permis difficilement de formuler des principes simples.

Le développement des sciences semble présenter aussi des cercles vicieux. Ceux-ci, tels seulement pour un esprit d'une logique trop absolue, ne sont que la conséquence du progrès dans les approximations qui forment la science, utilisant d'abord la connaissance vulgaire pour s'élever à la connaissance scientifique, puis, passant d'un premier concept à un concept plus étendu parfois en contradiction partielle avec le premier. Il est facile de citer des exemples de telles circonstances. Ainsi, Newton ayant, par une extension hardie, tiré des lois de Képler les lois de la gravitation universelle, une conséquence de ces dernières lois fut de montrer que la troisième loi de Képler ne pouvait être exacte. C'est que le soleil avait été supposé d'abord immobile et que l'on considéra ensuite le soleil comme lui-même en mouvement par rapport aux étoiles fixes (qui d'ailleurs elles-mêmes sont mobiles). Mais les masses de toutes les planètes sont très petites par rapport à la masse du soleil et les lois de Képler sont très approchées; c'est grâce à cette circonstance favorable de très petits rapports de masses qu'il a été possible d'arriver aux lois de la gravitation universelle.

VI

La mécanique classique a conduit à des types de relations différentielles, en postulant, plus ou moins explicitement, un principe de non-hérédité, d'après lequel les changements infiniment petits survenant dans un système dépendent uniquement de l'état actuel de celui-ci, et en supposant, en outre, que ces systèmes sont conservatifs, les lois physiques faisant connaître, bien entendu, pour chaque catégorie de phénomènes certaines fonctions qui se présentent dans ces relations. Ainsi s'est constitué une sorte de moule où on a cherché à enfermer la représentation analytique des phénomènes dans les diverses parties de la physique. Il a fallu, ensuite, élargir certains des concepts introduits, en particulier donner au concept de force une plus grande généralité. Ces retouches successives ne seront jamais terminées. Le nombre des éléments à introduire augmente ainsi sans cesse, à mesure que l'on veut serrer de plus près le réel; le microscope ne nous suffit plus, il nous faut l'ultramicroscope. Il a fallu aussi faire intervenir les milieux ou sortes de substances, comme l'éther ou les électricités, pour constituer les théories optiques ou électriques. Nos théories sont donc susceptibles de s'élargir en envisageant des éléments cachés à côté des éléments visibles, ces éléments cachés ne nous étant connus qu'indirectement et étant soustraits, au moins d'une manière directe, à notre action.

Les chimistes spéculent depuis longtemps sur de tels éléments cachés comme sont les molécules et les atomes, dont la considération est pour eux si féconde. L'introduction des éléments cachés reste une porte ouverte pour les mécanistes qui veulent garder les moules de la mécanique classique. Avec un système isolé, à éléments tous visibles, la forme des équations nous apprend que le système sera réversible, c'est-à-dire que le mouvement pourra être renversé, en changeant seulement le sens des vitesses; on pourra faire remonter au système le cours du temps. En réalité, il n'en est rien, et dans aucun phénomène nous ne disposons à un moment donné des valeurs de tous les éléments entrant en jeu et de leurs dérivées premières, ce qui peut constituer une explication, sinon de l'irréversibilité, au moins de sa possibilité. Héraclite avait raison de dire qu'aucun homme ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve : le monde ne peut faire machine en arrière.

Ces remarques montrent les difficultés et l'arbitraire que peuvent présenter les explications mécaniques; mais, malgré ces difficultés, le désir impérieux de chercher de telles explications a été, pour le développement de la science, un stimulant d'une grande fécondité. Les images, ou quelquefois les modèles qui prennent ainsi naissance sont pour beaucoup d'esprits une aide puissante dans la recherche, en même temps qu'elles rendent souvent accessibles certains résultats à ceux qui veulent les utiliser pratiquement. Mais à côté du

mécanisme, s'est développée une école énergétique, dont quelques représentants au moins envisagent autrement l'objet d'une théorie physique. Ils rompent avec l'ordre historique, et il n'est plus question avec eux de cette longue série d'approximations et de retouches successives. Ils posent tout d'abord quelques principes, comme celui de la conservation de l'énergie et le principe de Carnot sous les formes les plus générales, et ne voient dans les phénomènes que des transformations d'énergie. L'importance du point de vue énergétique est immense et personne ne songe à la nier, mais on peut penser qu'il y a là un esprit exclusif peu favorable à l'invention scientifique. Et tout d'abord l'énergétique est bien ingrate envers le mécanisme d'où est sorti dans un cas spécial le principe de la conservation de l'énergie. Ensuite, l'idée de la science que se forment les énergétistes est peu vivante, et a un caractère surtout didactique. En supposant qu'il ne soit pas absurde de parler du moment où la science sera finie, on pourrait dire que la meilleure manière de l'exposer sera la forme préconisée par l'énergétique ; on pourra alors commencer par poser des principes pour jamais acquis, et la recherche n'aura plus besoin d'être stimulée. L'énergétique pure, quand elle se borne systématiquement au concept d'énergie, est, si j'ose le dire, une science austère, drapée dans ses symboles, ne se permettant aucune image ni aucun modèle, et dont quelques-uns excluent même le concept de matière; en fait, l'énergétique et le mécanisme se

mêlent le plus souvent à des degrés divers dans les recherches des savants. Cela est fort heureux; ce n'est qu'en adoptant des points de vue divers, quelquefois opposés, que les sciences progressent, et il ne faut pas mutiler l'esprit humain.

Nous avons eu en vue dans ce qui précède les sciences physico-chimiques qui tendent de plus en plus à prendre une forme mathématique. Les sciences biologiques se présentent, en général, avec un autre caractère. Elles sont à un stade moins avancé avec des concepts moins élaborés. Aussi ne doit-on pas s'étonner que, dans certaines théories zoologiques, la méthode soit autre que dans les sciences physico-chimiques. Elle a souvent un caractère comparatif et historique; son maniement demande des habitudes d'esprit quelque peu différentes de celles habituelles aux savants qui sont adonnés aux sciences entrées dans une période plus mathématique. Tandis que le nombre des éléments à introduire dans l'étude d'un phénomène physique est pratiquement assez restreint, il serait nécessaire d'introduire un nombre immense de variables si on voulait en biologie faire des théories du même type que les théories mécanistes de la physique; cela semble pour longtemps, sinon pour toujours, impossible, et on peut se demander si les sciences biologiques seront susceptibles de revêtir, comme les sciences physico-chimiques, une forme mathématique. Un point essentiel aussi à noter est qu'il est impossible d'admettre le postulat de non-hérédité, que nous avons trouvé à la base du mécanisme classique, et

dont, avec de légères retouches on s'accommode au moins en première approximation dans les sciences de la nature inanimée. Le mécanisme proprement dit se présente donc en biologie avec d'énormes difficultés ; au contraire, les considérations globales de l'énergétique y rendent, notamment en physiologie, les plus grands services. Il faut élargir aussi le sens du mot explication, la prévision étant rarement possible sous forme quantitative, et on doit souvent se borner à rendre compte du sens d'une évolution dont on ne peut préciser les causes. Ceci ne veut pas dire que les phénomènes vitaux ne se ramènent pas aux phénomènes physico-chimiques. Tout au contraire, la biologie contemporaine pose le postulat de cette réduction : c'est pour elle une vue extrêmement féconde et les résultats obtenus dans cette voie en physico-chimie, particulièrement dans l'étude des diastases et des colloïdes, autorisent de grandes espérances.

VII

Au risque d'avoir à reprendre quelques-unes des considérations générales développées plus haut, je veux maintenant m'arrêter sur ce qui me paraît correspondre à la mentalité moyenne des hommes de science à notre époque. C'est une opinion très répandue que les savants s'intéressent beaucoup aujourd'hui à *la philosophie*; de nombreux et remarquables ouvrages sont publiés sur la philosophie scientifique et trouvent un grand nombre de lec-

teurs. N'y a-t-il pas là cependant une équivoque due à l'expression « *Philosophie des sciences* », par laquelle on désigne le plus souvent l'exposé des méthodes et des résultats généraux des sciences? Je crois qu'on rencontre rarement, parmi les savants adonnés aux sciences de la nature, physiciens, chimistes, biologistes, des esprits prenant quelque intérêt à ce qui est vraiment la philosophie. Il n'y a pas lieu de s'en étonner; tout au contraire. Les discussions chères aux écoles philosophiques de tous les temps sur le *réel* et sur le *vrai* semblent oiseuses à ceux qui observent et qui expérimentent.

Le savant (nous parlons bien entendu d'une manière générale en réservant les exceptions) est satisfait du sens commun. Il pose tout d'abord le postulat que le monde qui nous entoure est accessible à nos recherches et qu'il doit être intelligible pour nous. Il croit à la science à laquelle il consacre parfois sa vie, et il se méfie des critiques subtiles qui n'ont jamais conduit à des découvertes effectives. Claude Bernard disait, il y a déjà longtemps, que pour faire la science il faut croire à la science; c'est là incontestablement, pour celui qui cherche à faire œuvre scientifique, un point de départ et non un point d'arrivée. Il existe aujourd'hui une mentalité scientifique moyenne, caractérisée par l'admission des postulats énoncés plus haut, et l'écho des discussions, qui ont parfois laissé l'impression qu'il y avait une crise de la science, n'est pas sans provoquer quelque impatience dans les laboratoires. Le savant a, en général, l'impression que le philo-

sophe parle un autre langage que lui, et il ne cherche pas à le comprendre.

Qu'est-ce donc que cette *philosophie*, que nous paraissons, dans ce qui précède, opposer à la science? Je n'en connais pas de meilleure définition que celle donnée par Jules Tannery, quand il parlait un jour de « *ces inquiétudes que nous cultivons sous le nom de philosophie* ». Le philosophe excelle à voir partout des difficultés, les notions les plus simples et les plus usuelles présentant parfois d'inextricables difficultés quand on veut les approfondir. La philosophie agite le plus souvent des questions sans réponses, du moins sans réponses pouvant être acceptées de tous. J'ai dit tout à l'heure que le point de départ de la science est dans le sens commun. La première affirmation du sens commun est sans doute celle de l'existence d'objets extérieurs à notre conscience. C'est une idée compliquée que celle de matière, et il est insuffisant de dire, avec Huxley, que « la matière est un nom pour la cause inconnue et hypothétique de nos propres états de conscience ». Les théories de la perception sont innombrables; il faut une grande finesse de dialectique pour s'y aventurer. Si dans ce domaine on veut suivre M. Bergson, ce n'est pas sans peine qu'on atteindra « les données immédiates de la conscience », la perception, de l'avis de l'illustre philosophe, étant toujours mêlée de souvenirs. On peut discuter sans fin, pour savoir si en formant les concepts des objets extérieurs, en hypostasiant nos sensations, suivant l'expression de M. Meyerson, notre entendement n'obéit pas à

quelque principe interne, comme celui de causalité. Le terrain devient ici singulièrement mouvant, et dans ces spéculations d'ordre ontologique chacun pense suivant son tempérament.

Quelques-uns croient pouvoir éviter ces considérations métaphysiques sur le sens commun, en se plaçant au point de vue historique. Quoiqu'il y ait là quelque illusion, ce point de vue est d'un grand intérêt. Quand on parle de sens commun, il s'agit des époques historiques et des peuples civilisés, mais ce sens commun doit avoir une histoire. Il se peut que, dans l'humanité, de très anciennes façons de penser aient survécu, malgré tous les changements postérieurs survenus dans les conditions des hommes, et, dans son livre sur *le Pragmatisme*, William James adopte cette thèse que nos conceptions fondamentales sur les choses sont des découvertes faites par certains de nos ancêtres à des époques extrêmement éloignées et qui ont réussi à se maintenir à travers tous les siècles postérieurs. Ces conceptions forment le stade du sens commun. Ainsi auraient pris naissance les concepts de *chose*, de *temps*, d'*espace*, d'*influences causales*, de *réel*, et bien d'autres, suivant lesquels continue à penser tout homme, si cultivé soit-il, quand il n'est pas à ces heures de scepticisme aigu où le saisit « le doute métaphysique ». On décidera, suivant ses goûts, si les questions ont beaucoup avancé pour avoir été ainsi reculées dans le lointain des âges.

Mais laissons ces scrupules et ces inquiétudes philosophiques. C'est en partant du sens commun devenu

le moule dans lequel évolue la pensée humaine que s'est développée la science. Aussi a-t-on pu dire très justement que la science était le prolongement du sens commun, qu'elle rectifie d'ailleurs quand il y a lieu. C'est en tout cas l'opinion du savant dédaigneux des controverses philosophiques, dont il a été question au début. Sans doute il ne se désintéresse pas complètement des critiques relatives à la science surtout quand elles proviennent d'hommes ayant fait eux-mêmes œuvre scientifique. Il entend dire que, pour les uns qui partent d'un empirisme radical, la réalité empirique immédiate est de suite déformée sous l'influence de motifs pratiques, la science n'ayant alors aucune valeur de connaissance théorique et valant seulement pour l'action. Ce point de vue pragmatique lui est fort antipathique, et il apprend avec quelque étonnement que « tandis que pour les autres doctrines une vérité nouvelle est une *découverte*, pour le pragmatisme c'est une *invention* »[1]. Chez d'autres critiques de la science, celle-ci apparaît comme n'ayant de valeur que parce qu'elle conduit à une économie de la pensée, ou bien encore comme se ramenant à un système de conventions arbitraires mais commodes.

Notre savant, tout en admirant leur virtuosité philosophique, n'est guère touché en général par ces discussions. Il se contente, nous l'avons dit, des

1. C'est sous cette forme que M. Bergson, dans sa belle introduction du *Pragmatisme* de W. James, résume l'essentiel de la conception pragmatique de la vérité. (Voir la traduction du *Pragmatisme* de James, dans cette collection.)

données du sens commun, parmi lesquelles se trouve en premier lieu la notion du réel, dont la connaissance apparaît primitivement avec une incontestable valeur d'utilité, l'utile et le vrai étant dans ce stade inférieur extrêmement voisins. Mais la science a commencé précisément quand ce premier stade a été dépassé, et qu'on s'est représenté le monde extérieur comme un tout cohérent, accessible à notre intelligence : c'est le premier article de ce *credo* scientifique dont je parlais plus haut. Sans doute ce tout est d'une effroyable complication : il faut faire des distinctions, abstraire certains éléments de la connaissance pour n'en retenir que quelques-uns et arriver ainsi aux concepts qui jouent un rôle essentiel dans la genèse de la science. Indépendamment de leur origine même, l'histoire de la science montre assez que la formation des concepts présente un certain degré d'arbitraire, mais une analyse approfondie des conditions dans lesquelles notre représentation du réel doit être regardée comme vraie montre comment l'arbitraire, qui subsiste dans la formation de nos concepts, se trouve en quelque sorte canalisé ; nous devons parler d'*hypothèses*, mais non pas de *conventions*.

L'idée de loi et le principe de causalité sont aussi des postulats que nous trouvons à la base de la construction scientifique. Il semble que ces idées complexes ne sont susceptibles d'une signification précise que si on fait intervenir leur forme mathématique. Ainsi, pour prendre un seul exemple mais de grande importance, nous constaons que la

science s'est orientée de manière à éliminer le plus possible le temps de l'expression des lois qui apparaissent comme une relation de forme invariable entre choses permanentes; c'est ce qui a conduit en particulier à la forme des équations de la mécanique classique. Il se peut qu'il n'y ait là qu'une première approximation et que, dans certains cas, l'expression de la loi doive contenir explicitement le temps, mais je ne veux pas entrer dans une discussion où il serait vite question d'équations différentielles et d'équations intégrales [1].

Nos concepts et nos théories, au contact des faits, sont perpétuellement sujets à revision. La science, devenant de plus en plus objective et étendant notre connaissance du réel, avance peu à peu par corrections et accroissements progressifs. Qu'adviendra-t-il de ces approximations successives? Le savant pose le postulat, et c'est encore un article de la croyance à la science, que ces approximations successives sont convergentes, comme disent les mathématiciens, et que nous approchons sans cesse d'un petit nombre de vérités toujours plus compréhensives, synthèses des nombreuses vérités partielles peu à peu découvertes; c'est peut-être une chimère, mais elle soutient des générations de savants dans leur labeur jamais terminé.

Nous avons essayé d'indiquer succinctement les

1. Je fais allusion ici à ce que j'appelais un jour la mécanique *héréditaire* et la mécanique *non héréditaire;* sur cette dernière, M. Volterra a publié récemment de très remarquables travaux. (Voir la *Revue du mois*, 19 mai 1912.)

postulats fondamentaux qui se trouvent à la base de la genèse scientifique. Quelques-unes de ces notions initiales qui conditionnent notre savoir sont d'ordre métaphysique; n'hésitons pas à le dire, malgré l'horreur que certains professent pour ce mot qui leur paraît plein de dangers. A propos du sens commun, n'avons-nous pas déjà côtoyé tout à l'heure le terrain ontologique? D'ailleurs, comme nous l'avons dit, le savant prend ces notions toutes formées sans se soucier de leur origine.

Il est loisible à chacun de rejeter tel ou tel article du *credo* scientifique, mais alors il s'éloigne plus ou moins de la grande construction idéale que la majorité des savants appelle aujourd'hui « la science ». Nous avons déjà fait allusion à plusieurs de ces systèmes qui limitent *a priori* la connaissance scientifique et apparaissent à ce titre comme antiscientifiques. Pour quelques-uns, il restera toujours quelque contingence dans les lois de la nature, et cette thèse a été développée avec profondeur par M. Boutroux dans un livre qui a eu une très grande influence. D'autres professent que la construction scientifique au moyen de concepts ne peut saisir le flot mouvant des choses ; cette vieille philosophie du devenir et de la mobilité a été entièrement renouvelée depuis vingt ans par M. Bergson, qui l'a en outre parée de la richesse de son style imagé et poétique. Plus modestement, des chercheurs habitués aux difficultés de l'expérimentation, tout en reconnaissant que la science tend à devenir de plus en plus objective, ont insisté sur ce que l'objectivité complète de la

science est un but impossible à atteindre. Chacun retient de ces doctrines ce qui convient à sa mentalité, mais il faut reconnaître qu'elles ont peu influé sur l'idée que se font de la science la majorité de ceux qui s'y consacrent et que nous avons condensée plus haut dans une sorte de *credo*. Quoi qu'il doive advenir, et quelque évolution que subisse l'idéal scientifique par suite du développement même de nos connaissances, on peut affirmer que cet idéal reflétera toujours la curiosité passionnée et désintéressée de l'intelligence humaine. La confiance dans le progrès indéfini de la science est pour l'esprit de l'homme une noble espérance bien propre à l'enchanter.

VIII

Après avoir jeté un coup d'œil sur ce qui nous paraît correspondre à la mentalité moyenne de l'homme de science à notre époque, il faudrait examiner l'organisation et les conditions de la recherche scientifique. Les travaux scientifiques sont actuellement plus nombreux que jamais; on a même envie de dire qu'ils sont trop nombreux. Quelle que soit notre spécialité, nous sommes débordés par le nombre des recherches qui se publient dans le seul domaine où nous nous efforçons d'apporter notre pierre. L'illustre Gauss avait coutume de dire : *pauca sed matura;* c'est une devise qui a maintenant peu d'adeptes. On ne reverra plus, sans doute,

des cas analogues à celui du géomètre et physicien de Gottingen qui garda pour lui pendant tant d'années ses profondes études sur la géométrie non euclidienne et sur la théorie des fonctions elliptiques, laissant à Lobatchewski, puis à Abel et Jacobi, la gloire d'attacher leurs noms à ces grandes découvertes. Il est vrai que Gauss ne publia pas ses travaux sur le postulatum d'Euclide, parce qu'il craignait, comme il le dit, dans une lettre à Schumacher, « les clameurs des Béotiens »; voilà une pensée qui n'arrêterait plus guère aujourd'hui, car nous sommes à une époque où on redoute beaucoup moins le bruit.

Les raisons de la hâte avec laquelle nous voyons publier tant de travaux sont le plus souvent évidentes. La science est devenue une carrière; en publiant un mémoire, il arrive qu'on espère augmenter ses chances pour obtenir une position ou un avancement, et cela est assurément fort légitime. En déplorant la production de tant de travaux insuffisamment élaborés, nous nous plaçons d'ailleurs au point de vue de l'érudit ou du chercheur désireux de se tenir au courant des recherches les plus récentes; mais cette hâte n'est pas nécessairement défavorable à la science. Une idée a peine surgi dans un cerveau qu'elle est communiquée à quelque Société savante. Elle entre alors dans le domaine public et d'autres chercheurs peuvent, quand elle le mérite, tenter de l'exploiter, quelquefois au préjudice de celui qui l'a trop tôt livrée. La science avance ainsi plus rapidement

qu'autrefois, mais, plus encore que par le passé, elle tend à devenir œuvre collective et presque impersonnelle.

On se demande comment, au milieu des bouillonnements de la production scientifique actuelle, pourra s'y reconnaître l'historien de la science. Plusieurs pensent que l'histoire de la science est déjà bien conventionnelle, attribuant rarement la paternité d'une découverte à son premier auteur. Rien n'est, en effet, plus difficile à écrire que cette histoire; on y rencontre tant de légendes, de fausses attributions, de silences parfois intentionnels. Il faut une grande sagacité et des recherches patientes pour retrouver les premières traces d'une idée appelée à un grand avenir. Dans ses admirables travaux historiques, M. Duhem a ainsi ramené à la lumière plusieurs précurseurs; l'histoire du principe des vitesses virtuelles, fondamental en mécanique, remontant jusqu'au XIIIe siècle avec Jordanus de Nemore, est un bel exemple à citer. Dans l'antiquité, que de noms, sans doute, auraient mérité d'être inscrits au même rang que ceux d'Euclide ou d'Archimède, et qui sont et resteront toujours ignorés! Pour des temps plus récents, on a retrouvé de divers côtés chez des chimistes plus ou moins ignorés du commencement du XIXe siècle, la trace d'idées jouant un rôle essentiel dans la chimie physique actuelle. L'histoire des sciences est pleine de mutations au sens de Hugo de Vries, mais, plus sûrement encore que pour les mutations biologiques, on peut affirmer ici que

les sauts d'apparence brusque sont le terme de lentes transformations dans l'évolution de la pensée humaine.

IX

Terminons par quelques remarques sur l'organisation et les conditions du travail scientifique. On entend quelquefois dire qu'il y a actuellement une véritable anarchie dans les recherches, et que beaucoup d'efforts sont dépensés en pure perte. C'est là une question délicate. On doit sans doute souhaiter que les maîtres trouvent des élèves et des collaborateurs dévoués, prêts à travailler sous leur direction et à développer leurs idées. D'ailleurs, dans maintes parties de la science, les bonnes méthodes une fois trouvées, les applications ne demandent plus que de la patience et du soin, et il s'agit alors simplement, par exemple dans les laboratoires, d'avoir un nombre suffisant de bons préparateurs. Il est certes très utile qu'un sujet soit exploré dans tous les sens, et que des travailleurs patients et dévoués tirent d'une méthode tout ce qu'elle peut donner, mais il ne faut cependant pas confondre l'augmentation du rendement scientifique avec le progrès réel de la science. Les esprits originaux sont généralement rebelles à toute discipline, et les chercheurs bien doués trouvent eux-mêmes leurs sujets d'études.

Une autre question, distincte de la précédente, est celle des conditions du travail scientifique. La science et l'enseignement sont aujourd'hui dans une

étroite connexion. Le plus souvent le savant est en même temps un professeur. Il est évidemment singulier que des hommes d'un mérite scientifique reconnu ne puissent, à moins d'avoir une fortune personnelle, continuer leurs travaux, s'ils ne veulent pas suivre la carrière de l'enseignement. On peut, à ce point de vue, souhaiter la création d'établissements uniquement consacrés aux recherches. Les Universités (nous ne parlons bien entendu que des Facultés des Sciences) sont actuellement, en tous pays, les centres principaux du travail scientifique, et il est à désirer qu'elles le restent. Certaines poussées utilitaires tendent de plus en plus à faire des Universités les collaboratrices de l'industrie et de l'agriculture, et de bons arguments peuvent certes défendre cette orientation récente. Cependant, on risque d'être entraîné dans cette voie beaucoup plus loin qu'on ne le voulait d'abord; la lutte est inégale à notre époque démocratique entre la science désintéressée et ses fructueuses applications. Ainsi, il est à craindre que les crédits, plutôt que d'aller à un austère laboratoire de physique, où se font des recherches dont le plus grand nombre ne comprend pas l'objet et qui pour le moment au moins sont sans applications, n'aillent de préférence à des instituts d'un caractère technique plus ou moins spécial (instituts de laiterie et de papeterie, par exemple). Il est vain, je le sais, de vouloir en ce moment remonter ce courant; mais dans l'hypothèse où les Universités seraient amenées à placer au second rang le souci des progrès de la science, la

création des établissements dont je parlais plus haut deviendrait d'autant plus nécessaire [1]. Il serait prématuré de songer, dès maintenant, à leur organisation ; peut-être le premier modèle viendra-t-il de quelque pays voisin, où des dons généreux ont été faits en vue de telles créations.

1. Sans sortir des cadres actuels, il est désirable que des legs et dons soient faits aux établissements scientifiques (Facultés, Académies...), qui leur permettraient de donner pour un temps indéterminé à des chercheurs de grand mérite des subventions qui seraient de véritables traitements. En ce qui concerne les Facultés, ce seraient en quelque sorte des chaires sans enseignement. Chez nous, le Collège de France, en réduisant le nombre des leçons de ses maîtres, est entré dans cette voie.

CHAPITRE I

Sur le développement de l'analyse mathématique et ses rapports avec la mécanique et la physique.

I. Quelques remarques historiques. — II. L'analyse et la physique. — Du rôle de l'instrument mathématique. — III. Quelques vues sur l'avenir.

I

QUELQUES REMARQUES HISTORIQUES

Il n'est pas douteux que les mathématiques eurent longtemps un caractère expérimental. La géométrie fut d'abord une branche de la physique, et des propositions assez cachées, comme la propriété de l'hypoténuse d'un triangle rectangle, furent découvertes par l'expérience; à ces époques reculées, la science apparait avec un caractère surtout utilitaire. On fait généralement honneur aux Grecs d'avoir créé la science rationnelle et désintéressée; mais, au moins chez les premiers penseurs de la

Grèce, la mathématique reste intimement mêlée aux doctrines philosophiques et aux rêveries cosmogoniques. La devise des Pythagoriciens était que « les choses sont nombres », et les propriétés des nombres se trouvaient à la base de leurs explications sur l'univers ; leur géométrie avait parfois un caractère mystique et magique, comme en témoigne par exemple le fameux pentagone étoilé, qui servait de signe de reconnaissance aux adeptes de l'École et était considéré comme un symbole de la santé. Si nous arrivons maintenant à la géométrie classique, représentée par les livres d'Euclide et de ses successeurs, nous entrons incontestablement dans le domaine de la pure logique, où la déduction travaille sur les concepts lentement élaborés dans les âges antérieurs. Il faut cependant compléter cette vue. La géométrie fut quelque chose de plus pour les Grecs : ils y voyaient le type idéal de la science, où tout est d'une intelligibilité parfaite. On a noté d'ailleurs que cette science idéale de la géométrie grecque, étudiant des objets rationnellement construits, ne perd pas contact avec l'intuition spatiale d'où elle tire toutes ses conceptions, et c'est là un point capital. L'instrument mathématique pourra alors être utilisé pour une connaissance de l'univers, le réel étant en quelque sorte le monde sensible vu à travers les concepts de l'arithmétique et de la géométrie, et, quoique dans un domaine encore très restreint, nous comprenons pourquoi les sciences de la nature prennent de bonne heure une forme mathématique. Les travaux géométriques et méca-

niques d'Archimède en donnent un admirable exemple, et la recherche qu'il fit de l'aire d'un segment de parabole en s'appuyant sur le théorème des moments, symbolise bien la connexion étroite entre ce que nous appellerions aujourd'hui les mathématiques pures et les mathématiques appliquées. Dans les derniers siècles de l'hellénisme, alors que languissent les spéculations géométriques de l'époque antérieure, la trigonométrie et la géométrie sphérique se développent, sous l'influence des besoins de l'astronomie, entre les mains d'Hipparque et plus tard de Ptolémée. Ainsi, à son déclin, la science grecque nous offre un exemple, qui s'est présenté dans d'autres temps, de recherches mathématiques paraissant épuisées et se renouvelant sous l'influence de problèmes fournis par l'observation des phénomènes physiques.

Il n'est pas dans mon sujet de suivre à travers le Moyen Age et la Renaissance les transformations de l'algèbre géométrique des anciens, qui se sépare peu à peu de la géométrie. L'algèbre, proprement dite, arrive ainsi à l'autonomie, avec son symbolisme et ses notations de plus en plus perfectionnées, constituant une langue d'une admirable clarté qui, suivant le mot de Fourier, n'a pas de signe pour exprimer les notions confuses, et procure à la pensée une véritable économie. Les bonnes notations, tout le monde en convient, sont souvent indispensables pour arriver à la solution des problèmes posés. On peut, semble-t-il, aller plus loin, et dire qu'elles conduisent parfois à poser de nouveaux problèmes,

l'esprit étant soutenu et porté en avant par les symboles qu'il a créés; la théorie des équations algébriques en offrirait plus d'un exemple. Il y a même un danger dans cette facilité de créations symboliques : c'est au temps qu'il appartient d'en montrer l'utilité et la fécondité. A cet égard, notre langue algébrique usuelle a fait ses preuves, en rendant possibles les progrès ultérieurs des sciences mathématiques, et dans certaines parties de la physique mathématique, des symbolismes plus récents rendent d'incontestables services.

Au XVIIe siècle, le développement de la cinématique et de la dynamique naissante fut la cause des plus grands progrès de l'analyse. C'est de là que date l'analyse moderne; elle est vraiment sortie de la mécanique. L'origine de la notion de dérivée est dans le sentiment confus que nous avons de la mobilité des choses et de la rapidité plus ou moins grande avec laquelle s'accomplissent les phénomènes; les mots de *fluentes* et de *fluxions* marquent bien cette origine. Peu d'intégrations eurent plus de conséquences que celle de Galilée remontant de la loi des vitesses à celle des espaces dans le problème de la chute des corps, et il est impossible de séparer dans Huyghens et Newton le mécanicien et le physicien du mathématicien; tels les grands artistes de la Renaissance, que nous trouvons à la fois peintres, architectes et sculpteurs.

Ce fut une époque décisive dans l'histoire de la science mathématique que le moment où, allant bien au delà de ce qu'avaient pu rêver les Pythago

riciens, on se rendit compte avec précisino que l'étude des phénomènes naturels était susceptibie de prendre une forme mécanique, et cela surtout quand le développement de la mécanique conduisit à postuler que les changements infiniment petits, de quelque nature qu'ils soient, survenant dans un système, dépendent uniquement de l'état actuel de celui-ci. On fut ainsi amené à penser que la forme, à laquelle on se trouverait ramené, serait donnée par des équations différentielles, et nous vivons encore aujourd'hui sur ce principe qui, depuis le commencement du XVIIe siècle, a orienté le développement de l'analyse. Il serait injuste d'oublier que les problèmes posés par la géométrie ont eu quelque part aussi dans cette orientation, mais, pour garder un point de vue plus uniforme, et si je ne craignais d'être accusé de paradoxe, je pourrais alléguer, comme je le disais plus haut, que la géométrie fait partie de la physique.

II

L'ANALYSE ET LA PHYSIQUE

L'histoire des mathématiques, en ses points les plus essentiels, se confond, au XVIIe siècle, avec celle de la mécanique et de la physique, et de savantes recherches sur la théorie des fonctions ont montré récemment que des problèmes fondamentaux dans cette théorie se sont présentés de bonne heure.

Ainsi Clairaut, dans sa théorie de la figure de la terre, considère pour la première fois des intégrales curvilignes et donne la condition pour qu'elles ne dépendent pas du chemin suivi entre deux limites déterminées. Pareillement, les deux équations fondamentales de la théorie des fonctions d'une variable complexe apparaissent tout d'abord dans un mémoire sur la résistance des fluides sous la plume de d'Alembert, qui voit le rôle joué dans leur étude par le symbole $\sqrt{-1}$, déjà introduit par Leibnitz et Jean Bernoulli; un peu plus tard, d'Alembert écrivait pour la première fois l'équation $\Delta\varphi = 0$. On sait qu'une analyse, présentant avec les recherches précédentes une grande analogie, lui donnait aussi l'intégration de l'équation des cordes vibrantes. On retrouve encore les fonctions d'une variable complexe dans un mémoire plus récent d'Euler sur le mouvement des fluides, et dans les travaux de Lagrange sur les cartes géographiques. Ainsi une des théories de l'analyse moderne, qui a eu le plus d'éclat au XIXe siècle, a trouvé son origine dans des problèmes de mécanique et de physique.

L'étude de l'attraction n'a pas eu moins d'importance pour le développement de l'analyse. On aurait peut-être pu souhaiter pour la simplicité des calculs laborieux de la mécanique céleste une autre loi que celle du carré de la distance, mais, si la nature nous devait une compensation, il faut avouer qu'elle nous l'a largement donnée, en permettant de créer la théorie du potentiel newtonien, aucune autre loi d'attraction n'étant susceptible de poser à

ce point de vue tant de problèmes féconds et d'un intérêt général. Dans cet ordre d'idées, l'équation dite de Laplace, à laquelle satisfait le potentiel en dehors des masses attirantes, est à signaler tout particulièrement; se rencontrant aussi en hydrodynamique et dans la théorie de la chaleur, elle a conduit à différents types de problèmes aux limites qui, étendus à des équations plus générales, sont encore aujourd'hui l'objet des préoccupations des analystes. Lagrange déplorait qu'il n'y eût qu'un système du monde à découvrir. Nous serions presque tentés de croire à notre tour qu'on ne retrouvera plus une mine aussi féconde que cet ensemble de théories physiques liées à la considération du potentiel newtonien, si nous ne savions que, dans les sciences de la nature, nos représentations et nos concepts évoluent avec les progrès de l'observation et de l'expérience, ce qui fait que des regrets, comme celui de Lagrange, ne sont pas justifiés. Il y aura toujours quelques coins du système du monde à explorer, et sans doute, les mathématiciens l'espèrent du moins, quelques problèmes d'analyse à nous poser à leur sujet.

La théorie analytique de la chaleur dans l'immortel ouvrage de Fourier a ouvert aussi la voie à bien des problèmes, et nous y trouvons des méthodes d'intégration au moyen de solutions simples, inspirées par les questions physiques elles-mêmes. Quelquefois, en effet, celles-ci ne donnent pas seulement le matériel analytique, sur lequel travaillera le mathématicien, mais elles lui fournissent des indications

sur la marche à suivre dans la solution. Ainsi, dans les théories moléculaires, les équations aux dérivées partielles se présentent comme des transformées limites, mais plus maniables, d'équations aux différences finies ou d'équations différentielles ordinaires; or, il peut arriver précisément que, pour deviner la forme des solutions, il soit utile de revenir à ces dernières équations. C'est ce qui arrive à Fourier, quand il étudie la communication de la chaleur entre des masses disjointes et en fait l'application au cas où le nombre des masses est infini. On a eu recours souvent, depuis Fourier, à des considérations de ce genre pour établir des théorèmes d'existence, en passant ensuite à la limite, et l'on pourrait indiquer des travaux tout récents sur les équations fonctionnelles, qui utilisent au fond la même idée, dont la mise en œuvre peut présenter de grandes difficultés. Ce sont là des cas où la physique rend à l'analyse un double service, lui proposant des problèmes et lui suggérant des vues pour leurs solutions.

On a souvent cité la belle page du discours préliminaire de Fourier, où il développe cette pensée que l'étude approfondie de la nature est la source la plus féconde des découvertes mathématiques, mais il faut reconnaître qu'il y parle plus en physicien qu'en géomètre, quand il insiste sur la nécessité d'aller jusqu'aux dernières applications numériques, condition nécessaire, dit-il, de toute recherche, et sans laquelle on n'arrive qu'à des transformations inutiles. Fourier réduit trop ici le rôle de

l'analyse mathématique, et, si la physique a été l'origine première de grandes théories analytiques, le mathématicien rend au physicien d'autres services que de lui donner des possibilités de prévisions numériques. Nous avons tous rencontré des savants adonnés aux sciences expérimentales, pour qui c'est là la seule utilité des mathématiques. C'est méconnaître l'admirable puissance de transformation du raisonnement et du calcul mathématiques. Peut-on, par exemple, ne pas être saisi d'admiration quand on lit le célèbre mémoire de Green, resté longtemps inaperçu, sur l'application de l'analyse aux théories de l'électricité et du magnétisme, et dont Gauss, Chasles et Thomson, devaient dix ans plus tard retrouver les résultats ? Le calcul devançait ici l'expérimentation, en découvrant des théorèmes fondamentaux sur l'induction électrostatique à laquelle des expériences mémorables devaient ultérieurement conduire Faraday.

En entrant un peu plus dans le détail de la théorie des équations aux dérivées partielles, nous trouverions d'autres exemples, qui caractérisent bien les services que les mathématiques peuvent rendre à la physique. Ainsi une vue très nette des différentes espèces d'ondes, au point de vue de la propagation, est résultée de la considération des différents types d'équations. Dans les équations du type de la théorie de la chaleur, l'étude des intégrales montre que toute variation se fait sentir instantanément à toute distance, mais très peu à grande distance, et l'on ne peut parler alors de vitesse de propagation ; en un

point, la température passe par un maximum pour décroître ensuite, et le temps au bout duquel ce maximum est atteint est proportionnel au carré de la distance. On sait que Lord Kelvin a appliqué l'équation de Fourier à la propagation des courants électriques dans les câbles, en négligeant l'effet de la self-induction; il a ainsi montré que les signaux atteindraient pour chaque pertubation leurs maxima dans un temps proportionnel au carré de la distance, et ce résultat de la théorie a joué un rôle essentiel dans l'établissement de la télégraphie transatlantique. Les choses se passent autrement dans le cas des équations du type de la propagation du son, qui est aussi celui de la propagation de la lumière et des ondes électriques. L'effet ici n'est pas immédiatement senti, il dure pendant un certain temps et disparaît ensuite, tout au moins dans les milieux à une et trois dimensions.

Les deux types précédents se trouvent en quelque sorte condensés dans l'équation relative à la propagation du son dans un liquide visqueux, des ondes électriques dans un diélectrique légèrement conducteur ou dans une ligne télégraphique pour laquelle la self-induction n'est pas négligeable. Il y a, dans ce cas, encore propagation par ondes avec une vitesse déterminée, mais cette onde s'étale en arrière et laisse une trace qui demeure indéfiniment; elle peut, dans les communications télégraphiques, être une source de confusion dans les signaux, et l'on s'est ainsi rendu compte des résultats contradictoires obtenus autrefois dans la recherche de la vitesse de l'électricité.

Ces questions de propagation d'ondes, si intéressantes pour la Physique, n'ont peut-être pas un moindre intérêt psychologique. C'est grâce à l'absence des résistances passives que peut en général se conserver au loin, pour la vue et pour l'ouïe, la netteté des sensations; ce qui fait, comme on l'a dit, de ces deux sens les sens intellectuels par excellence. A cet égard, le sens de la vue est inférieur à celui de l'ouïe, en raison de la dispersion de la lumière, dispersion que ne présentent pas les sons modérés. Il faut d'ailleurs y ajouter le rôle considérable joué en acoustique par les harmoniques, rôle bien moindre en optique où l'œil ne perçoit pas une octave; et ceci ne nous éloigne pas des mathématiques, s'il est vrai, comme le prétendent quelques physiologistes, que l'organe de Corti dans le labyrinthe de l'oreille doive être regardé comme l'organe du sens arithmétique et nous fournisse notre concept du nombre.

Il faut avouer cependant que les mathématiques ont leurs ennemis, et les services considérables rendus par l'analyse à la physique sont quelquefois niés. On objecte que beaucoup de résultats analytiques ne font que traduire de simples intuitions, et peuvent s'exprimer sous forme d'analogies physiques, sans qu'il soit nécessaire de recourir aux symboles mathématiques et aux équations différentielles; on cite, entre autres, l'exemple de l'illustre Faraday. On peut répondre d'abord que l'on fait du calcul intégral de bien des manières, et l'on en fait en comptant des lignes de forces. Il n'est toutefois

pas possible d'aller bien loin dans cette voie sans le secours de la langue analytique apportant sa précision à des notions menaçant de rester vagues et peu aptes à fournir des résultats quantitatifs. Faraday, s'il eût été géomètre, eût pu devancer Maxwell dans la recherche des lois de la propogation des ondes électriques. L'exemple antérieur de Fresnel est du même ordre ; il eut l'intuition géniale des vibrations transversales de l'éther, mais pouvait-on se faire une idée vraiment précise de la distinction générale entre les vibrations transversales et les vibrations longitudinales, avant d'avoir écrit les équations aux dérivées partielles du mouvement d'un milieu élastique? j'en doute pour ma part. Je ne veux pas dire qu'on ne puisse adresser certaines critiques à notre vision mathématique de la nature, mais elles sont d'un ordre plus général ; j'aurai l'occasion d'en dire un mot tout à l'heure.

III

DU ROLE DE L'INSTRUMENT MATHÉMATIQUE

Nous venons de montrer par des exemples particuliers les relations réciproques de la Mathématique et de la Physique. D'une manière générale, dans le développement des diverses parties de la Mécanique et de la Physique, à une période d'induction succède une période déductive, où l'on s'efforce de donner aux principes une forme définitive. Le

développement mathématique et formel joue alors un rôle très important, et le langage analytique est indispensable à la plus grande extension des principes. Le symbolisme, dont on peut dire beaucoup de mal, est cependant très fécond à certaines heures; il soutient et porte l'esprit en avant, et les généralisations se font avec le moindre effort. Par le simple jeu de ses symboles, l'Analyse peut suggérer des généralisations dépassant de beaucoup le cadre primitif, ne fût-ce quelquefois que par des raisons de symétrie. N'en a-t-il pas été ainsi avec le principe des déplacements virtuels, dont l'idée première vint des mécanismes les plus simples; la forme analytique qui le traduisait et où apparaissaient des sommes de produits de deux facteurs, suggéra des extensions qui conduisirent de la Mécanique rationnelle à la Mécanique chimique à travers la Physique tout entière. Un autre exemple est encore fourni par les équations de Lagrange; ici des transformations de calcul ont donné le type des équations différentielles auxquelles certains savants ont proposé de ramener la notion d'explication mécanique. L'art du mathématicien a créé un moule témoignant de l'importance de la forme d'une relation analytique; il va de soi qu'il appartient à l'expérience de vérifier ensuite si l'instrument forgé est assez souple pour se prêter à des concordances expérimentales.

De tels exemples montrent assez ce que signifie une phrase, qu'on entend quelquefois répéter, à savoir qu'il n'y a dans une formule que ce qu'on y

a mis; elle est vide de sens ou n'est qu'un pur truisme. Des notions, identiques au fond, peuvent avoir des formes très différentes, et il arrive que la forme soit essentielle; telle aussi l'énergie peut être constante en quantité, mais variable en qualité. Aux cas cités plus haut, on pourrait ajouter la Mécanique céleste, où il n'y a rien de plus que la formule de la gravitation universelle et quelques constantes fournies par l'observation, mais où d'innombrables transformations de calcul nous font passer de ce point de départ à l'explication de presque toutes les particularités des mouvements des astres.

Nous citerons encore un cas de la puissance suggestive des transformations analytiques en rappelant l'ordre d'idées se rattachant au principe de la moindre action. De très bonne heure on eut l'intuition vague d'une certaine économie dans les phénomènes naturels; un des premiers exemples en fut fourni par le principe de Fermat, relatif à l'économie du temps dans la transmission de la lumière, et l'on arriva à reconnaître que les équations de la Mécanique classique correspondent à un problème de minimum. Les extensions se présentèrent alors d'elles-mêmes, conséquences nécessaires des transformations analytiques de la méthode des variations, qui donnent même d'utiles indications sur les conditions aux limites. Nous retrouvons toujours le même mécanisme : au sentiment vague le symbolisme mathématique donne une forme précise qui suggère des généralisations.

On sait l'importance qu'a aujourd'hui dans l'évolution de la Mécanique le principe de la moindre action. Ce vieux principe, d'allure théologique, semble être notre dernier retranchement dans la crise, exagérée peut-être, que traverse actuellement la Mécanique, et dans cet ordre de questions on a repris récemment, en lui donnant une grande extension, une idée émise jadis par Laplace d'une Mécanique du point rapportée à une action fonction quelconque de la vitesse, ce qui conduit à une masse variable avec cette dernière.

IV

QUELQUES VUES SUR L'AVENIR

On voit assez, en parcourant, comme nous venons de le faire, l'histoire des rapports entre la physique et la mathématique, les services que l'une et l'autre se sont rendus. C'est sous l'influence de l'étude des phénomènes physiques que se sont organisées les principales disciplines des sciences mathématiques; bien souvent cette étude a, indirectement au moins, posé les problèmes et même donné des indications pour leurs solutions. En retour, sans parler des faits nouveaux que la puissance de transformation de l'analyse a su mettre en évidence avant l'expérience, et sans insister sur les prévisions numériques auxquelles elle est apte, rappelons seulement que la netteté de son langage a donné une forme précise et

maniable à des notions condamnées autrement à rester vagues, et aussi quelle force de généralisation possèdent ses symboles. Quoique nous n'ayons plus la foi ardente de Fourier et de l'admirable école des physiciens géomètres de la première moitié du siècle dernier, l'analyse mathématique nous apparaît toujours comme un instrument indispensable à la Physique et quelquefois comme un guide précieux.

En parlant de la symbiose entre la mathématique et la physique, nous n'avons fait que constater un fait résultant du développement même de la science. Si maintenant nous voulons voir les choses de plus haut, il faut nous demander à quoi tient cette alliance qui nous paraît nécessaire; nous devons chercher aussi si elle n'a pas des points faibles et si elle n'est pas susceptible de prendre d'autres formes.

La science physique se présente à nous comme une vue du monde extérieur à travers des concepts tirés par abstraction de l'expérience. Un système de concepts, associé à des faits particuliers et à certaines hypothèses, est susceptible d'être transformé par des déductions convenables. Si ces concepts sont d'ordre mathématique, nous avons une vision mathématique du monde extérieur, sur laquelle peut opérer notre logique. Mais tout cela ne va pas sans sacrifices; le réel, qu'envisage le physicien mathématicien, est bien pâle à côté de celui que saisit l'intuition vulgaire. Pour pouvoir faire œuvre scientifique avec cette réalité confuse, on a dû la simplifier, ce qui n'a pas été sans la décolorer. Nous pouvons alors raisonner sur cette nature réduite. S'il y a là une

force, il y a aussi une cause de dangers. Ceux-ci sont toutefois atténués par l'arbitraire que présentent dans une certaine mesure la formation des concepts et le choix des hypothèses intervenant dans les théories. Nous touchons ici à un point qui intéresse extrêmement les mathématiciens, car il s'agit du matériel même sur lequel ils ont à travailler.

En adoptant, avec la notion du point matériel, les idées qui sont à la base de la mécanique classique, nous serions conduits tout d'abord à regarder un phénomène comme correspondant à un nombre immense d'équations différentielles, où les accélérations de tous les points sont des fonctions de l'ensemble de leurs coordonnées. Mais une telle représentation n'est féconde que dans des cas très particuliers. On est obligé, dans chaque ordre de questions, de mettre en évidence certaines propriétés moyennes d'un groupe de points, température, pression, etc., qu'on regarde comme fonctions des coordonnées d'un point général et du temps. Admettant que chaque point est surtout influencé par les points voisins, on est conduit alors à des équations aux dérivées partielles, où, conformément à l'hypothèse fondamentale de la mécanique classique, certaines dérivées partielles par rapport au temps s'expriment à l'aide de ces fonctions et de leurs dérivées par rapport aux coordonnées.

C'est là le moule ordinaire des équations de la physique mathématique, élargi parfois par l'introduction de termes de même nature relatifs aux résistances passives. Il représente la forme analytique

sous laquelle se condense notre vision mathématique des choses. Ces représentations se sont montrées extrêmement fécondes, et de nombreux exemples en ont été rappelés tout le long de ce chapitre. Mais bien des hypothèses simplificatrices ont été faites, et il est permis de prévoir que l'on ne pourra pas toujours s'y tenir. Les conséquences en seront très importantes pour nous, et de nouveaux sujets d'étude en résulteront sans doute pour l'analyste.

Il arrivera peut-être un jour où, si j'ose le dire, la dilution de la matière nécessaire à son traitement mathématique, au lieu de se faire dans un ensemble continu, se fera dans quelque autre ensemble partout dense, mais cette perspective est sans doute assez lointaine. D'autres possibilités sont plus prochaines. Parfois, dans certaines questions, l'influence sur une partie du système des parties éloignées de ce système ne peut être négligée, et le problème pris dans sa généralité ne se présente plus sous forme d'équations différentielles, mais sous forme d'équations fonctionnelles où entrent d'ailleurs des dérivées des fonctions inconnues, les intégrales qui figurent dans ces équations étant étendues au volume occupé par le système considéré. On sait avec quel succès un type particulier d'équations fonctionnelles a été étudié dans ces derniers temps, et comment un ensemble de questions, qui avaient fait l'objet des recherches les plus délicates, s'est trouvé ramené à des principes extrêmement simples; mémorable exemple, après tant d'autres, de la facilité que peut

apporter à la solution d'un problème particulier un point de vue plus général. Pour certaines conditions aux limites, il y a même grand intérêt à substituer des équations fonctionnelles à des équations différentielles, et l'on remplirait des volumes avec les travaux publiés dans cet ordre d'idées depuis une dizaine d'années.

Une étude systématique d'équations fonctionnelles de plus en plus compliquées devra donc dans un prochain avenir solliciter l'effort des chercheurs. Un domaine plus vaste que celui des équations différentielles, et les comprenant comme cas particuliers, s'ouvre devant nous. Nous n'y marchons pas au hasard, guidés dans le choix des formes à traiter par la mécanique ou la physique.

Pour un avenir plus lointain, on peut prévoir des problèmes plus complexes encore. La mécanique, nous l'avons rappelé, a longtemps postulé plus ou moins explicitement un principe de non-hérédité. Nous nous accommodons encore de ce principe, au moins en première approximation, dans les sciences de la nature inanimée, quoique de nombreux phénomènes indiquent que l'état actuel garde la trace des états antérieurs; tels ces corps, comme le soufre, qui ont une vitesse de transformation d'une forme en une autre, différente suivant leur histoire antérieure. Mais l'hérédité joue surtout un rôle capital dans les sciences de la vie, et nous ne savons pas si nous pourrons utiliser jamais l'instrument mathématique pour l'étude du mécanisme intime des phénomènes biologiques, et si nous ne devrons pas tou-

jours nous contenter de moyennes grossières et de courbes de fréquences. Il ne faut pas cependant réduire à l'avance notre conception mathématique du monde, et nous pouvons rêver d'équations fonctionnelles plus compliquées que les précédentes, parce qu'elles renfermeront en outre des intégrales prises entre un temps passé très éloigné et le temps actuel, intégrales qui apporteront la part de l'hérédité.

Ces espérances sont peut-être chimériques. Sur le terrain mouvant de la vie où figurent un nombre énorme de variables, il se peut qu'il soit impossible de former des équations fonctionnelles, relatives à certains états moyens, devant jouer le même rôle que les équations différentielles de la physique mathématique actuelle. Mais si le philosophe peut faire des réserves, il n'y a pour le mathématicien aucun danger à s'abandonner à ces vues audacieuses, qui le poussent à travailler dans une direction certainement féconde.

Et, encore une fois, le monde extérieur aura guidé le mathématicien dans ses recherches analytiques, l'orientant vers les voies utiles à parcourir. Nous avons vu qu'il en a été toujours ainsi, et nous pouvons affirmer qu'il en sera de même dans l'avenir. Pour en revenir au commencement de ce chapitre, la vraie place des mathématiciens est à côté de ceux qui s'occupent des sciences de la nature. Qu'elle soit justifiée ou non, ils ont la prétention de leur offrir des moules simples sous lesquels ils puissent contempler logiquement le monde extérieur. En échange

l'étude des sciences de la nature rend aux mathématiciens un service d'un haut prix, en les guidant dans l'infinie variété des formes que conçoit notre esprit. Sous ce point de vue, la mathématique n'est pas la science étrange et mystérieuse que se représentent tant de gens; elle est une pièce essentielle dans l'édification de la philosophie naturelle.

CHAPITRE II

Sciences mathématiques et Astronomie.

I. Les principes de l'Analyse. — II. Les principes de la Géométrie. — III. Le développement des Mathématiques pures. — IV. La Mécanique céleste et l'Astronomie physique.

I

LES PRINCIPES DE L'ANALYSE

Dans la seconde moitié du siècle dernier, l'attention des mathématiciens s'est portée sur les fondements des différentes branches de la pensée mathématique. En particulier, depuis vingt ans, un grand nombre de publications ont paru sur la philosophie des sciences mathématiques; elles sont bien en accord avec les tendances de l'époque où nous vivons, et où l'esprit humain applique dans des directions variées une critique de plus en plus pénétrante. Placé à ce point de vue, on a trouvé même dans le nombre entier, comme j le rappelais au début du

chapitre précédent, des difficultés que n'a pas dédaignées un grand physicien comme Helmholtz. Plus grandes encore étaient les difficultés relatives aux nombres incommensurables qui, dans l'antiquité, avaient tant troublé les géomètres grecs; pour les analystes modernes, un nombre incommensurable représente, dans l'ensemble des nombres rationnels, une coupure qui correspond à un partage de ces nombres rationnels en deux classes.

L'étude arithmétique du concept du continu est loin d'être simple, et a donné lieu à de nombreuses recherches, parmi lesquelles il faut citer celles de M. Dedekind et de M. G. Cantor. Nous ne pouvons que nous y arrêter un moment. Pour les anciens analystes, la notion était tout intuitive, se rattachant, par exemple, à la vue d'un segment de droite; dans l'ensemble des points d'une droite qui forme le continu linéaire, il y a dans tout intervalle, si petit qu'il soit, des points appartenant à l'ensemble. Cette propriété a été longtemps considérée comme caractéristique du continu. En fait, l'ensemble des points d'une droite correspondant à une abscisse rationnelle jouit de la propriété précédente et est distinct du continu linéaire. A cette propriété de l'ensemble qu'on exprime souvent en disant qu'il est dense, il faut en adjoindre un autre pour caractériser l'ensemble continu.

On l'exprime, en disant que, de plus, l'ensemble doit être parfait. Voici ce que l'on entend par un ensemble parfait. Dans un ensemble de points, on appelle point-limite un point A dans le voisinage

duquel (si petit que soit autour de lui ce voisinage) il y a toujours un point de l'ensemble autre que A. L'ensemble *dérivé* d'un ensemble donné est l'ensemble formé par ses points-limites. Un ensemble est dit *parfait*, quand il coïncide avec son dérivé. Le continu est un ensemble à la fois parfait et dense. L'ensemble des nombres commensurables est bien dense, mais il n'est pas parfait, puisqu'il ne contient pas ses points-limites qui correspondent à des nombres incommensurables.

Ces notions sont très abstraites, mais le caractère de ces spéculations est précisément une grande méfiance de l'intuition, et c'est ici un peu la lutte entre l'intuition et la logique. Au reste, on rencontre toujours dans l'histoire de la science les principales notions avec un caractère tout d'abord purement intuitif, et ce n'est que beaucoup plus tard que commence l'examen critique. Ainsi les géomètres n'ont pas pendant longtemps éprouvé le besoin de définir la longueur d'un arc de courbe ou l'aire d'une surface ; c'étaient pour eux des notions premières. L'intuition ne pouvait évidemment amener à considérer des courbes non rectifiables ou des aires non quarrables. Il en est de même pour l'idée de fonction, c'est-à-dire de dépendance entre deux ou plusieurs grandeurs, sur laquelle repose toute la science mathématique. Il a fallu longtemps avant qu'on se rendît compte de l'étendue extraordinaire de cette notion. On doit, d'ailleurs, reconnaître qu'il est indispensable, pour les progrès de la science, que les choses paraissent d'abord simples. Sans vouloir

trop généraliser, on peut dire que l'erreur est quelquefois utile, et que, dans les époques vraiment créatrices, une vérité incomplète ou approchée peut être plus féconde que la même vérité accompagnée des restrictions nécessaires. L'histoire de la science confirme plus d'une fois cette remarque. Si, par exemple, Newton et Leibnitz avaient pensé que les fonctions continues n'ont pas nécessairement une dérivée, ce qui est le cas général, le calcul différentiel n'aurait pas pris naissance ; de même, les idées inexactes de Lagrange sur la possibilité des développements en séries de Taylor ont rendu d'immenses services, et il est heureux que Newton ait eu, au début de ses recherches, pleine confiance dans les lois de Képler. Mais, sans prolonger cette digression, pour laquelle je puis, d'ailleurs, renvoyer au chapitre précédent, nous devons revenir à l'examen des principes de la mathématique moderne.

L'idée de fonction s'est singulièrement agrandie depuis cinquante ans. Les fonctions *usuelles* rentrent dans les fonctions analytiques de Lagrange, c'est-à-dire développables, en général, par la formule de Taylor ; ne se tenant pas à cette définition, toute une école de géomètres a approfondi la notion de fonction prise dans toute sa généralité. Ce fut, pour l'époque, un résultat bien remarquable, quand les travaux de Riemann et de Veierstrass montrèrent qu'il existe des fonctions continues n'ayant pas de dérivées. Toutes les propositions accordées pour les fonctions usuelles doivent être reprises, quand on se place au point de vue le plus général.

Le mot *infini* revient souvent en mathématiques, mais les mathématiciens n'ont vu longtemps dans ce terme qu'une expression indiquant un nombre supérieur à tout nombre donné, laissant certains philosophes disserter sur l'infini statique et l'infini dynamique, et, comme le disait M. J. Tannery : « La notion de l'infini dont il ne faut pas faire mystère en mathématiques se réduit à ceci : après chaque nombre entier, il y en a un autre ». Depuis les travaux de M. Cantor sur les ensembles, et particulièrement sur les nombres transfinis, des points de vue nouveaux ont été introduits, dont il appartient à l'avenir de montrer l'importance. On doit attacher un grand intérêt à cette remarque, d'après laquelle l'ensemble des nombres rationnels est *énumérable*, tandis que l'ensemble des nombres ne l'est pas, ce qui revient à dire que les nombres rationnels peuvent être affectés à un numéro d'ordre déterminé, tandis que les nombres irrationnels ne sont pas susceptibles d'être *comptés;* une sorte de brèche est ainsi faite dans l'*infini*. Il serait trop long de nous arrêter ici sur les nombres ordinaux transfinis. Nous donnerons plus aisément une idée des nombres cardinaux transfinis, en revenant aux ensembles. Deux ensembles, entre les éléments desquels peut être établie une correspondance uniforme, sont dits avoir la même puissance ou le même nombre cardinal que l'ensemble des nombres entiers. Ce nombre cardinal, que nous pouvons appeler a, est le premier nombre cardinal transfini. A l'ensemble des nombres réels correspondra, au contraire, une puissance ou un

nombre cardinal différent de a; désignons-le par c. Il existe des ensembles dont la puissance ou le nombre cardinal n'est ni a ni c ; ainsi, on peut montrer qu'à l'ensemble de toutes les fonctions possibles d'une variable, définies dans un certain intervalle, correspond un nombre cardinal plus grand que c. Ceci suffit à faire entrevoir une sorte d'arithmétique des nombres transfinis, sur laquelle on a déjà publié de nombreux travaux. Il n'y aura lieu évidemment de la développer que si ces vues se montrent fécondes dans l'analyse ; la considération des nombres transfinis a permis déjà de découvrir certains théorèmes, mais on doit dire qu'ils ont pu ensuite être obtenus par une autre voie. Ces spéculations sur l'infini forment un chapitre tout nouveau dans la science mathématique de ces dernières années, mais il faut reconnaître que ce chapitre n'est pas exempt de paradoxes. C'est ainsi que l'on a pu définir certains nombres appartenant et n'appartenant pas tout à la fois à des ensembles déterminés. Toutes les difficultés de ce genre résultent de ce que l'on ne s'entend pas sur le mot *existence* Certains adeptes de la théorie des ensembles sont des scolastiques, qui auraient aimé à discuter les preuves de l'*existence* de Dieu avec saint Anselme et son contradicteur, le moine de Noirmoutiers Gaunilon.

L'extension de nos idées sur les fonctions et sur l'infini n'est pas la seule qu'aient poursuivie depuis trente ans les mathématiciens qui s'intéressent aux principes de la science ; la question des quantités

complexes a vivement excité l'intérêt, d'autant plus qu'une certaine obscurité planait sur elle, qu'entraînait le mot souvent usité, mais peu heureux, de quantités imaginaires. Le sujet ne présente plus aujourd'hui rien de mystérieux. En supposant que les lois commutative et associative subsistent, Weierstrass a réalisé des systèmes de nombres où figurent *n* symboles et où tous les nombres sont formés linéairement avec ces symboles; il fait, en outre, l'hypothèse que la somme, la différence, le produit et le quotient de deux nombres du système font eux-mêmes partie du système. Il y a une infinité de tels systèmes de nombres complexes. Ces nombres diffèrent seulement en un point des nombres complexes ordinaires. Quand *n* est supérieur à deux, il peut exister des nombres différents de zéro, dont le produit par certains autres nombres est nul. On appelle ces nombres des diviseurs de zéro. Malgré cette singularité, cette nouvelle algèbre est réductible à l'algèbre des nombres complexes ordinaires; il n'y a donc là qu'une curiosité et nullement un instrument nouveau dont puisse profiter l'analyse mathématique.

Nous avons admis que les lois commutative et associative subsistaient dans l'algèbre précédente. On s'est placé à un point de vue plus général en supposant que seule la loi associative subsiste, abandonnant la loi commutative, de telle sorte que le produit de deux facteurs ne soit pas nécessairement indépendant de l'ordre des facteurs. On a alors une algèbre beaucoup plus générale; un exemple

célèbre d'un système à quatre unités est fourni par les *quaternions* d'Hamilton. De nombreux travaux ont établi des classifications dans cette théorie. On demandera si ce vaste symbolisme est susceptible d'accroître un jour la puissance de l'analyse. Il est permis de penser que ces algèbres nouvelles n'auront d'autre intérêt pratique que de conduire à des notations plus condensées, ce qui peut, d'ailleurs, avoir son prix, comme on le voit pour les quaternions, dont l'emploi est si prisé en Angleterre par les physiciens.

II

LES PRINCIPES DE LA GÉOMÉTRIE

Après les principes de l'analyse, l'étude des bases de la géométrie n'a pas moins attiré l'attention : tout n'est pas si clair que le croient beaucoup de personnes dans les commencements de la géométrie, et d'Alembert a pu écrire jadis que la définition et les propriétés de la ligne droite sont l'écueil et le scandale de la géométrie. Nous sommes aujourd'hui bien convaincus qu'il y a dans toute science un point au delà duquel on ne peut remonter : il faut poser certaines données, certains concepts, et formuler au sujet de ces concepts des axiomes ou postulats qui reviennent, au fond, à les définir. On posera, par exemple, au début de la géométrie élémentaire, les concepts de point, de ligne droite, et on formulera cet axiome que deux points détermi-

nent toujours une droite. C'est pour le géomètre un difficile problème que d'établir la géométrie sur un système complet et non contradictoire d'axiomes indépendants; dans ces derniers temps, des travaux remarquables, tels que ceux de M. Veronese et surtout de M. Hilbert, ont été publiés dans cette voie. Suivant qu'on adopte tel ou tel système d'axiomes, on aura telle ou telle géométrie. On peut maintenant se demander quelle est l'origine de ces postulats. Pour Kant, la source de nos connaissances géométriques est dans l'intuition, et les axiomes, plus ou moins explicitement formulés au début de la géométrie ont un caractère de nécessité absolue; l'espace est pour Kant une forme *a priori* de notre sensibilité. Les géomètres ne souscrivent pas en général à cette opinion, depuis qu'on a montré que diverses géométries, exemptes de toute contradiction logique, peuvent être obtenues en partant de divers systèmes de postulats, mais certains philosophes continuent à y voir une confirmation de la doctrine kantienne, selon laquelle, entre toutes les formes logiquement possibles d'espace, une seule nous est donnée et imposée, comme forme d'intuition, par notre nature d'êtres sensibles, et non par notre raison.

L'observation et l'expérience jouent un rôle indispensable dans la forme de nos connaissances géométriques; mais, tout en admettant ce point indiscutable pour la plupart, les avis sont encore très partagés. Quelques physiciens voient uniquement lans les axiomes des inductions basées sur les ervations et les mesures faites sur les corps :

c'est l'empirisme géométrique. D'autres attribuent un rôle plus ou moins grand à l'esprit travaillant sur les données de l'expérience. Pour certains, même, comme M. Poincaré, le concept *de groupe*, sur lequel nous reviendrons dans un moment, et dont il a été déjà question au chapitre précédent, préexiste dans notre esprit et s'impose comme forme de notre entendement; en outre, plusieurs interprétations de l'expérience sont possibles, et parmi celles-ci l'esprit a choisi la plus *commode* et la plus *simple*. Je me suis expliqué dans l'introduction sur la signification de ces mots en même temps que sur ce qu'est pour nous le réel. Les biologistes, dominés par la thèse évolutionniste, ne manquent pas de demander aux mathématiciens ce que c'est que l'esprit *humain* et sa *logique*; pour eux, la commodité et la simplicité résultent de l'hérédité et de l'habitude, et la logique n'est que le résumé de l'expérience ancestrale. Dans un article sur la logique et l'expérience, M. Le Dantec plaisante, avec esprit, ceux qui parlent d'un monde non euclidien et il ajoute : « Si les choses étaient autrement, nous aussi nous serions autrement, mais nous ne pourrions exister qu'adéquats aux choses ». Sans discuter sur le sens du mot *adéquat*, je dirai simplement qu'on peut regarder la géométrie comme une *théorie* relative aux *faits géométriques*, en entendant le mot *théorie* comme nous le ferons plus loin en mécanique et en physique. D'une manière plus précise, il paraît impossible de séparer l'acquisition des notions géométriques des notions physiques les plus simples, la

géométrie dans des temps très anciens ayant fait partie de la physique. Sans changer l'ensemble de ces notions, on ne peut, semble-t-il, remplacer le groupe euclidien par un autre. On retombe ainsi, sous un autre point de vue, sur les idées de Gauss, qui considérait comme un fait expérimental que la courbure de notre espace est nulle, et regardait le système euclidien comme plus *vrai* que les autres systèmes géométriques.

Ceci dit, nous allons rester maintenant sur le terrain mathématique, et sur celui de la logique au moins actuelle. J'ai fait tout à l'heure allusion à divers systèmes possibles de postulats. Si on ouvre un traité de géométrie élémentaire, on ne trouve formulé bien explicitement qu'un seul axiome : il porte le nom de *postulatum d'Euclide*. En réalité, un nombre considérable d'axiomes sont sous-entendus, et, en étudiant les plus récents travaux sur les principes de la géométrie, on est effrayé à la vue de la longue liste des postulats nécessaires à poser pour que la géométrie ait toute la rigueur logique qu'on lui attribue généralement. Les plus importants se rapportent aux concepts de droites, de plans, d'angles, de congruences; il en est un autre, d'une nature différente, qu'il pourrait paraître inutile de formuler, c'est l'axiome de continuité ou axiome d'Archimède. Au point de vue logique, ce serait une erreur. Ainsi on a pu construire des géométries étranges dans lesquelles, en portant à partir d'un point d'une droite une succession de segments égaux, il n'est pas possible d'atteindre un point déterminé

de la droite, quelque grand que soit le nombre de ces segments; or, l'axiome d'Archimède affirme précisément cette possibilité.

Tout le monde aujourd'hui a entendu parler de la géométrie euclidienne et des géométries non euclidiennes. Un *postulatum*, célèbre dans la science, porte le nom d'Euclide. Le célèbre géomètre grec demande que l'on accorde que par un point on ne peut mener qu'une parallèle à une droite (l'énoncé d'Euclide avait une forme un peu différente, mais il revient entièrement au précédent). Il avait vainement essayé de rattacher logiquement cette affirmation aux données plus ou moins intuitives sur lesquelles il fondait la géométrie. Pendant longtemps, on chercha une démonstration du fameux *postulatum*. Ces démonstrations sont intéressantes à parcourir, on y retrouve tous les genres d'erreurs souvent rééditées dans le courant du siècle dernier, et que reverra sans doute de temps en temps le siècle présent; ce sont toujours des substitutions à l'hypothèse euclidienne d'une autre hypothèse que l'auteur juge plus évidente. Quoiqu'il se termine par des erreurs, il faut signaler cependant à part un travail d'un Jésuite italien, le père Saccheri, paru en 1733 sous le titre pittoresque « Euclides ab omni nœvo vindicatus ». Au lieu de substituer à l'hypothèse euclidienne quelque autre postulat paraissant plus plausible, le père Saccheri veut atteindre le but cherché en montrant qu'on rencontre des contradictions, si on n'admet pas le célèbre postulat. Considérons avec lui un quadrilatère plan $ABCD$,

dans lequel deux côtés opposés AD, BC sont égaux et perpendiculaires à un troisième AB. Si on admet l'hypothèse euclidienne, les angles C et D sont droits; si on ne l'admet pas, les angles sont encore égaux, et on peut supposer qu'ils sont droits, aigus ou obtus. Saccheri croit pouvoir montrer qu'on arrive à des contradictions, si on n'est pas dans le cas de l'angle droit; cette partie du mémoire est mauvaise, mais l'auteur fait auparavant quelques remarques fondamentales qui le placent, malgré lui, parmi les précurseurs des géométries non euclidiennes. Il montre que, suivant que l'on sera dans le cas de l'angle droit, de l'angle aigu ou de l'angle obtus, la somme des angles d'un triangle sera égale, inférieure ou supérieure à deux droits, et il voit très bien que celle de ces circonstances se présentant pour un seul triangle se présentera pour tout autre triangle, proposition que Legendre devait retrouver plus tard pour le cas où la somme est égale ou inférieure à deux droits.

Dans cet historique des géométries non euclidiennes, si rapide qu'il soit, on doit citer encore Lambert, dont les résultats les plus remarquables sont relatifs à l'aire d'un triangle, quand on abandonne l'axiome d'Euclide, aire dans l'expression de laquelle figure l'excès positif ou négatif de la somme des angles du triangle sur deux angles droits; la géométrie sphérique occupa beaucoup Lambert et il eut l'intuition très nette que le cas où la somme des angles d'un triangle est moindre que deux droits correspond à la géométrie sur une sphère de rayon

imaginaire. Enfin Legendre s'occupa longuement du *postulatum* d'Euclide ; en particulier, il montra très simplement que dans un triangle, la somme des angles d'un triangle ne peut surpasser deux droits, mais sa démonstration, il ne faut pas l'oublier, suppose que la droite est infinie, hypothèse qui n'est pas vérifiée dans la géométrie sphérique où e rôle de la droite est tenu par les actes de grand cercle. Il résulte aussi clairement des recherches de Legendre que le postulat d'Euclide revient à dire que la somme des angles d'un triangle est égale à deux droits. On peut, d'ailleurs, donner bien d'autres formes au *postulatum* d'Euclide, en posant qu'il existe des droites équidistantes, ou encore qu'il existe des figures semblables. L'illustre Gauss, qui, dès les dernières années du XVIIIe siècle, avait approfondi toutes ces questions, sans en rien dire que dans quelques lettres particulières publiées il y a seulement peu d'années, regardait l'axiome d'Euclide comme équivalent à l'assertion que l'aire d'un triangle peut grandir indéfiniment.

Comme je viens de le dire, Gauss, craignant sans doute « les clameurs des béotiens », dant il parle dans une de ses lettres, ne publia rien des recherches où il établissait que la négation du *postulatum* d'Euclide n'entraîne aucune contradiction. A la géométrie non euclidienne, où la droite a une longueur infinie, se rattachent les noms de Lobatschewski et de Bolyai qui, indépendamment l'un de l'autre, édifièrent une géométrie où la somme des angles d'un triangle est inférieure à deux angles droits. Le point de départ

de Lobatschewski et de Bolyai est le suivant : étant donnés dans le plan une droite et un point, les droites menées par le point se partagent en deux classes, suivant qu'elles rencontrent ou non la droite donnée. Ces deux catégories de droite sont séparées par les *deux parallèles* (coïncidentes dans le cas euclidien) que l'on peut mener du point à la droite. L'hypothèse des deux parallèles menées par un point à une droite, caractérise le système de géométrie qu'on appelle souvent *géométrie hyperbolique*, et qui correspond au cas de l'angle aigu dans le quadrilatère de Saccheri, dont je parlais plus haut. Le cas où les deux parallèles coïncident correspond à la géométrie euclidienne ou *parabolique*; c'est le cas de l'angle droit de Saccheri. Un chapitre fondamental de la géométrie hyperbolique concerne la trigonométrie non euclidienne, c'est-à-dire les relations entre les angles et les côtés d'un triangle. Comme l'avait prévu Lambert, la géométrie hyperbolique trouve une interprétation dans la géométrie analytique sur une sphère de rayon imaginaire. A un tout autre point de vue, Beltrami donna plus tard de la géométrie de Lobatschewski une représentation remarquable en montrant que la géométrie plane du géomètre russe est identique à la géométrie sur les surfaces à courbure constante négative, du moins quand on se borne à une portion limitée du plan et de la surface correspondante.

Dans la géométrie hyperbolique, on peut mener par un point deux parallèles à une droite. On peut admettre, au contraire, avec Riemann, que par un

point on ne puisse pas mener de droite ne rencontrant pas une droite ; on aura alors une seconde géométrie non euclidienne dite *elliptique*, dans laquelle la somme des angles d'un triangle dépasse deux droits. Ici le plan n'est plus infini, c'est-à-dire que les distances sur une géodésique restent finies. La géométrie elliptique peut être interprétée par la considération des sphères de l'espace euclidien ; toutefois, cette interprétation n'est valable que pour une portion limitée du plan non euclidien et non pour le plan tout entier. Une autre interprétation dans l'espace ordinaire de la géométrie plane elliptique, valable pour le plan entier, a été donnée par M. Klein ; considérons dans l'espace ordinaire l'ensemble des droites et des plans passant par un point, puis les angles dièdres formés par deux tels plans, toute relation entre ces éléments sera la traduction d'une relation dans le plan non euclidien, en substituant aux mots *droite*, *plan*, *angle dièdre*, les mots *point*, *droite* et *angle*.

On s'est naturellement demandé comment on pouvait être assuré que, dans des déductions des géométries non euclidiennes, on ne rencontrerait jamais de contradictions. Les interprétations, auxquelles il a été fait plus haut allusion, sauf celles de M. Klein pour la géométrie elliptique, ne donnent pas une réponse satisfaisante, mais celle-ci peut être fournie par la considération des formules auxquelles on arrive en géométrie hyperbolique et qui ne sont autres, comme je le disais tout à l'heure, que celles de la trigonométrie sphérique ordinaire, en sup-

posant le rayon de la sphère purement imaginaire.

Toutefois, si l'on est ainsi assuré que le *postulatum* d'Euclide ne peut être démontré en restant dans le plan, il reste un doute sur l'impossibilité de la démonstration en employant des constructions hors du plan. L'étude des géométries ne doit donc pas se borner au plan ; ce fut là l'œuvre de Riemann, d'Helmholtz et, il y a vingt ans, de Sophus Lie. Tous trois se placent à un point de vue analytique et considèrent l'espace comme une multiplicité, c'est-à-dire qu'un point est défini par un système de trois nombres qu'on appelle les *coordonnées du point* ; on ne pose plus alors ici la notion de plan et de droite, on part du point comme élément. Riemann a été dans cette voie, alors toute nouvelle, un initiateur. Considérant même des espaces à un nombre quelconque de dimensions, il introduit l'importante notion de *courbure* d'un espace, généralisant les notions classiques dues à Gauss sur la courbure des surfaces. Particulièrement importants sont les espaces à *courbure constante*. Un caractère fondamental des espaces à courbure constante est qu'on peut dans ces espaces déplacer une figure sans altérer ses longueurs et procéder dans les démonstrations par supposition des figures. Pour le cas de deux dimensions, suivant que la courbure constante est négative ou positive, on a la géométrie hyperbolique ou elliptique dont nous parlions plus haut. Dans un espace à trois dimensions à courbure constante, on a des déplacements possibles qui dépendent de *six* paramètres, et, en

étudiant ces déplacements, on peut envisager à un nouveau point de vue les hypothèses fondamentales de la géométrie. C'est Helmholtz qui posa le premier la question sur ce terrain. La théorie des groupes n'était pas encore créée à l'époque où le célèbre physicien écrivait son mémoire; il était presque inévitable qu'il commît quelques erreurs. Cette étude fut complètement reprise par Sophus Lie.

J'ai déjà parlé plusieurs fois de *groupes*; c'est une notion qui joue un rôle fondamental dans la science de notre époque, sur laquelle il convient de dire quelques mots. Imaginons, avec Sophus Lie, que n relations permettent de transformer n variables en n autres variables, ces relations dépendant d'un certain nombre de paramètres arbitraires. Faisons de plus l'hypothèse que deux transformations de cette forme effectuées successivement donnent une transformation rentrant dans le même type, les valeurs des paramètres étant seulement changées. S'il en est ainsi, on a un *groupe de transformations*. Lie a fait la découverte capitale que la recherche de tous ces groupes, pour un nombres donné de variables et de paramètres, se ramène à l'intégration d'équations différentielles ordinaires. Je ne citerai qu'un résultat, le plus simple de tous ceux qu'a obtenus Sophus Lie; quand il n'y a qu'une seule variable, le groupe peut, par un choix convenable de cette variable, être ramené au groupe linéaire et contient au plus trois paramètres.

Revenons aux principes de la géométrie et aux

résultats obtenus par Lie. On a dans l'espace, dont on considère une portion limitée, un groupe de mouvements à *six* paramètres sur lequel on fait diverses hypothèses. D'abord ces mouvements laissent invariable une certaine fonction des coordonnées de deux points quelconques. L'origine de cette hypothèse s'aperçoit d'elle-même ; en langage ordinaire et sans signe algébrique, on peut dire grossièrement que, en la faisant, on veut qu'il y ait relativement à deux points de l'espace *quelque chose* qui reste invariable après le mouvement ; on pourra appeler ce quelque chose la distance de deux points. En second lieu, on veut, comme le disait Helmholtz, que le mouvement *libre* soit possible dans une certaine région de l'espace. Voici ce qu'on doit entendre par cette hypothèse complexe. Tout d'abord, quand un point de la région est fixé, tout autre point de cette région, *sans aucune exception*, décrit une surface (multiplicité à deux dimensions). Ensuite, quand deux points sont fixés, un point arbitraire (des exceptions étant possibles) décrit une courbe (multiplicité à une dimension) ; enfin, si trois points arbitraires sont fixés dans la région, tous les points de celle-ci restent en repos (des exceptions étant possibles). Telles sont les conditions que nous imposons à l'espace. Il y a seulement deux types d'espace satisfaisant à ces conditions. C'est tout d'abord l'espace ordinaire, ou euclidien auquel nous sommes habitués ; puis deux espaces, qu'on peut appeler *non euclidiens* et qui sont dans le cas de trois dimensions les analogues des plans hyperbolique ou elliptique de tout

l'heure. C'est là une proposition bien remarquable et qui montre que les espaces euclidien et non euclidien sont les seuls où on puisse faire logiquement les hypothèses qui, dégagées, bien entendu, de leur forme scientifique, sont regardées, par quiconque n'a pas réfléchi à ces questions, comme ayant un caractère nécessaire.

La démonstration du résultat précédent est très délicate. Ainsi les mots « sans aucune exception » que nous avons soulignés plus haut sont d'une extrême importance. Si l'on cherche le groupe des mouvements à six paramètres satisfaisant à la seconde condition, on ne trouve que les groupes euclidiens et non euclidiens, mais si on supprime les mots soulignés, on reconnaît qu'il existe d'autres groupes que les précédents.

Ajoutons encore que les problèmes analogues dans le plan admettent des solutions entièrement différentes : les espaces à deux dimensions euclidiens et non euclidiens ne sont pas caractérisés par les propriétés qui leur appartiennent uniquement dans le cas de trois dimensions. Cette circonstance n'avait pas autrefois échappé à Helmholtz. Si nous revenons à la question posée tout à l'heure relativement à l'impossibilité de toute contradiction, il est clair que du point de vue analytique où se place Sophus Lie, il n'y a aucune difficulté.

Au point de vue du géomètre norvégien, l'étude des principes de la géométrie peut donc être regardée comme épuisée, mais on ne doit pas oublier qu'il se borne à considérer une petite portion de l'espace

et suppose d'ailleurs que les fonctions servant à caractériser les groupes de mouvement satisfont aux conditions ordinaires de l'analyse infinitésimale. Clifford autrefois et Klein plus récemment ont appelé l'attention sur la question de la *connexité* de l'espace qui est extrêmement intéressante. Il est facile de se rendre compte de ce qu'on entend par là, en se bornant au cas d'une multiplicité à deux dimensions; la surface d'une sphère est différente de la surface d'un tore, au point de vue des courbes fermées tracées sur la surface. Sur la première, toute ligne fermée partage la surface sphérique en deux régions, tandis qu'il en est autrement sur la surface du tore, où on peut tracer deux courbes, soit un parallèle et un méridien qui ne limitent aucune portion de la surface; l'ordre de *connexité* des deux surfaces n'est pas le même. Peu importe quelle est la connexité de l'espace, quand on se borne à envisager une partie assez petite, mais il n'en va plus de même, quand on considère l'espace dans son ensemble. Nous ne savons évidemment rien de la connexité de l'espace où nous vivons; nous ne pouvons que faire la supposition qu'il est simplement connexe.

Nous nous sommes arrêté un peu longuement sur les géométries dites non euclidiennes, qui ont le plus de rapports avec notre géométrie ordinaire. Ces géométries d'espaces à courbure constante pourront très peu différer de celle-ci, si la courbure est très voisine de zéro. On n'a pas manqué de dire que la courbure de notre espace n'était peut-être pas nulle, mais seu-

lement presque nulle; c'était, semble-t-il, l'opinion de Gauss, et il n'est pas douteux que la pensée de vivre dans un espace dont la courbure n'est pas nulle a donné une certaine popularité aux géométries non euclidiennes. Dans cet ordre d'idées, on peut aller plus loin, admettre, par exemple, que la courbure de l'espace varie avec les lieux et avec le temps. Pour quelques-uns, ce sont là de pures rêveries : ils pensent que quel que soit l'espace où nous vivions, nous aurions toujours fait une interprétation de nos sensations dans le langage euclidien qui est pour nous le plus commode. C'est un point auquel j'ai déjà fait allusion plus haut, et sur lequel on peut se donner le plaisir de disserter indéfiniment.

Nous sommes loin d'avoir épuisé l'ensemble des études se rapportant aux principes de la géométrie. Dans ces dernières années, la question de l'indépendance des postulats a surtout préoccupé les géomètres allemands, et c'est en construisant des géométries affranchies de tel axiome, que l'indépendance de ces axiomes a été établie par M. Hilbert. On remarquera aussi combien il est inexact de parler, comme on le fait quelquefois, des *trois* seules géométries possibles (hyperbolique, parabolique, elliptique).

Le nombre des géométries logiquement possibles est infini ; tout dépend des systèmes de postulats que l'on adopte. Déjà Riemann avait considéré, dans sa célèbre dissertation inaugurale, des géométries dans des espaces à courbure variable d'un point à l'autre La liste serait longue à dresser des géométries, analogues aux géométries non euclidiennes, qui partent

généralement un nom illustre précédé d'une négation. Une des plus curieuses est la géométrie non-archimédienne, où l'on n'admet pas l'axiome d'Archimède, dont j'ai dit un mot tout à l'heure; dans cette géométrie, les procédés par exhaustion ne peuvent être employés dans les démonstrations. Ceci est particulièrement intéressant pour la mesure des aires, et on peut faire à ce sujet quelques remarques concernant notre géométrie usuelle. En géométrie plane, deux polygones équivalents sont égaux par addition ou par soustraction, c'est-à-dire peuvent être décomposés en triangles égaux, ou bien peuvent être regardés comme des différences de polygones susceptibles d'être ainsi décomposés. Il n'en est pas de même dans la géométrie de l'espace; Gauss avait déjà il y a longtemps appelé l'attention des mathématiciens sur ce point. On a récemment établi que deux tétraèdres qui ont même base et des hauteurs égales ne sont pas toujours égaux par addition ou soustraction, c'est-à-dire ne peuvent pas être décomposés en tétraèdres égaux ou être regardés comme des différences de polyèdres décomposables en tétraèdres égaux. La stéréométrie ne peut donc pas, comme la planimétrie, être faite sans recourir à des procédés d'exhaustion ou de limite.

Mais j'en ai dit assez sur les principes de la géométrie. Pour beaucoup de personnes, les recherches de ce genre paraîtront de bien étranges imaginations. Il n'est cependant pas sans intérêt de mettre à nu les très nombreux postulats indépendants qui sont à la base de notre géométrie, et qui n'ont pas les carac-

tères de nécessité logique que leur attribue l'intuition, celle-ci n'épuisant pas toutes les possibilités logiques. Tout esprit philosophique doit à ce titre s'y intéresser. Au point de vue mathématique, l'étude des principes de la géométrie a offert, comme nous l'avons dit, à Sophus Lie un beau champ d'applications pour la théorie des groupes de transformations qu'il venait de créer. De même, quarante ans auparavant, la théorie des formes quadratiques de différentielles s'était développée grâce aux recherches de Riemann sur les hypothèses qui sont à la base de la géométrie. C'est ainsi que des études, qui paraissaient avoir d'abord un caractère purement philosophique, ont contribué aux progrès des sciences mathématiques.

III

LE DÉVELOPPEMENT DES MATHÉMATIQUES PURES

Il ne serait pas possible d'entrer dans quelques détails sur les progrès des mathématiques pures sans faire intervenir des symboles ou des signes d'opérations qui ne seraient pas ici à leur place. Tâchons seulement d'indiquer les voies dans lesquelles se poursuivent avec le plus de succès les recherches d'analyse et de géométrie.

Nous avons déjà dit un mot de l'importance qu'ont prise, à cause de leur simplicité même, les fonctions *analytiques*. Depuis Lagrange, et surtout après les travaux de Cauchy, de Weierstrass et de Riemann,

la théorie des fonctions analytiques est devenue une branche maîtresse de l'analyse mathématique. Elle doit son brillant essor à la découverte de quelques propositions générales parmi lesquelles se trouvent au premier rang les théorèmes de Cauchy, sur l'intégration le long d'un contour. Depuis vingt ans, une partie importante de l'effort mathématique a été consacrée soit aux fonctions analytiques en général, soit à certaines fonctions spéciales. Ne pouvant entrer ici dans le détail de ces recherches abstraites, qu'il me suffise de citer les noms de MM. Poincaré, Mittag-Leffler, Picard, Appell, Goursat, Painlevé, Hadamard et Borel entre bien d'autres. Les singularités des fonctions analytiques et leurs diverses représentations par des séries, des intégrales définies, des fractions continues ont été étudiées d'une manière approfondie. Parmi les travaux les plus récents relatifs aux développements en série, mentionnons les développements dus à M. Mittag-Leffler, les études de M. Hadamard sur les séries de Taylor. Les séries divergentes avaient été quelquefois employées par les géomètres du dix-huitième siècle et du commencement du dix-neuvième siècle, leur pénétration les avait fait le plus souvent échapper aux dangers des raisonnements fondés sur de telles considérations, mais sous l'influence de Cauchy, de Gauss et aussi d'Abel qui, dans une de ses lettres, traite d'invention du diable les séries divergentes, celles-ci avaient été proscrites de l'analyse mathématique. Dans ces derniers temps, M. Borel les a réhabilitées en introduisant la notion de série

divergente sommable et l'utilisant pour l'étude des propriétés des fonctions. Parmi les fonctions particulières, après le merveilleux développement de la théorie des fonctions algébriques d'une variable et des transcendantes qui s'y rattachent, après les brillants travaux de M. Poincare sur les fonctions fuchsiennes, les fonctions algébriques de deux variables devaient solliciter l'effort des chercheurs. Les études de M. Picard sur ces questions concernent le point de vue transcendant, elles se rapportent aux intégrales de différentielles totales et aux intégrales doubles que l'on peut attacher à une surface algébrique. Les travaux de M. Noether, de MM. Castelnuovo, Enriques et Humbert se rapportent surtout au point de vue géométrique et algébrique. Le champ si vaste des fonctions analytiques de plusieurs variables est maintenant attaqué de différents côtés. et les résultats déjà obtenus promettent pour un avenir prochain une ample moisson de découvertes.

Si le concept de fonction analytique comprend aujourd'hui dans son domaine les fonctions les plus importantes de l'analyse, on ne doit pas cependant négliger d'approfondir l'idée de fonction dans toute sa généralité. J'en ai déjà montré plus haut le grand intérêt philosophique. Depuis les travaux déjà anciens de Riemann, de Weierstrass et de Hankel, ces études ont été poursuivies avec succès par MM. Darboux et Jordan, par M. Dini, M. Volterra et quelques autres géomètres, parmi lesquels on doit citer M. Baire et M. Lebesgue. A cet ordre d'idées se rattachent les travaux extrêmement nombreux sur les séries de

Fourier qui jouent un si grand rôle en mathématiques pures et dans presque toutes les questions de physique mathématique. On rencontre sans doute dans beaucoup de ces recherches des fonctions bien bizarres, et quelques-uns demanderont à quoi pourront servir des fonctions aussi singulières. Il est facile de répondre que les fonctions n'ont pas besoin de servir à quelque chose, et que l'étude de l'idée de fonction mérite d'être faite pour elle-même. Mais de plus, avec la complexité croissante des phénomènes naturels dont nous devons aborder l'étude, les images que nous pourrons nous en faire ne nous conduiront-elles pas à employer, pour leurs représentations, d'autres fonctions que les fonctions analytiques? Il serait téméraire de formuler une réponse négative. D'autres considérations montrent encore la nécessité de ne pas se borner systématiquement aux fonctions analytiques, comme nous le dirons dans un moment.

Toute l'histoire de la science montre les rapports qui unissent l'analyse pure et les phénomènes naturels; c'est ce qu'on a vu dans le chapitre précédent. Cette solidarité se traduit mathématiquement quand on a ramené l'étude d'un phénomène à des équations différentielles; ainsi, pour Fourier, l'étude de la propagation de la chaleur se ramène à une équation aux dérivées partielles que l'on devra intégrer à l'aide de conditions aux limites propres à chaque cas. De même, tous les résultats de la théorie mathématique de l'élasticité se concentrent dans un système classique d'équations différentielles. Nous

reviendrons sur cette réduction au point de vue de la mécanique et de la physique, quand nous parlerons de l'explication des phénomènes naturels. Nous avons montré dans le premier chapitre l'intérêt considérable s'attachant à l'étude des équations différentielles. Des méthodes variées ont été proposées pour démontrer l'existence des intégrales remplissant des conditions diverses; il ne faudrait pas croire d'ailleurs que de telles recherches soient simplement des raffinements de rigueur intéressant seulement les purs analystes; on ne saurait trop répéter que *la vraie rigueur est féconde*, se distinguant par là d'une autre purement formelle et ennuyeuse, qui répand l'ombre sur les problèmes qu'elle touche. Il est d'une extrême importance, dans maintes applications, de savoir dans quel champ se trouveront certainement définies les intégrales déterminées par les conditions initiales : à cette question doivent répondre les recherches précédentes. C'est ici qu'il est parfois très important de ne pas se borner systématiquement aux fonctions analytiques; les hypothèses inutiles ainsi introduites ont conduit souvent à délimiter pour les intégrales des champs d'existence beaucoup moins étendus que ceux qui peuvent être obtenus en se plaçant à un point de vue plus général.

Les problèmes posés par l'étude des équations différentielles sont en nombre immense. Depuis trente ans, des voies nouvelles ont été ouvertes et dans des directions variées. Il faudra sans doute une longue suite d'efforts pour venir à bout des

questions posées, mais nous commençons à nous rendre compte de la nature des difficultés qu'il faudra vaincre. La plupart des géomètres qui se sont occupés de la théorie générale des fonctions analytiques ont apporté aussi leurs contributions à l'étude des équations différentielles ordinaires, commencée jadis à ce point de vue par Cauchy et continuée par Briot et Bouquet et par Fuchs. Les recherches les plus récentes qui doivent être mentionnées dans cet ordre sont celles de M. Painlevé et de ses élèves, que la considération de certaines équations du second ordre a conduit à des transcendantes nouvelles irréductibles à des transcendantes déjà connues.

La physique mathématique indiquait, nous l'avons dit, des types de problèmes du plus haut intérêt; cette voie féconde est suivie par de nombreux chercheurs. C'est actuellement un des sujets qui doivent attirer le plus les mathématiciens. On y risque moins que dans d'autres domaines de s'égarer dans des impasses et dans des recherches stériles, les questions étant le plus souvent posées par la physique. Ici encore on retrouve la distinction entre les fonctions analytiques et les fonctions non analytiques. Il est des phénomènes où on ne rencontrera certainement que des fonctions analytiques, car on a pu établir que les équations différentielles qui les régissent n'avaient que des intégrales analytiques. Pour d'autres, au contraire, il en est tout autrement; tels sont, par exemple, ceux où on rencontre des propagations d'ondes. Il y a là, pour le mathé-

maticien, des problèmes de natures très différentes où des résultats extrêmement remarquables ont été récemment obtenus.

Je viens de dire quelle mine fructueuse ont été et seront pour l'analyste la mécanique et la physique mathématique. On a pu voir dans le chapitre précédent qu'il ne faudrait pas cependant professer une opinion trop systématique sur cette marche parallèle de la théorie pure et des applications comme le faisait, avec Laplace, Fourier, Poisson, la brillante école française de physique mathématique du commencement du siècle dernier.

Pour eux, l'Analyse pure n'était que l'instrument, et Fourier, en annonçant à l'Académie des Sciences les travaux de Jacobi, disait que les questions de la Philosophie naturelle doivent être le principal objet des médiations des géomètres; « on doit désirer, ajoutait-il, que les personnes les plus propres à perfectionner la science du calcul dirigent leurs travaux vers ces hautes applications si nécessaires au progrès de l'intelligence humaine ». Ce désir très légitime ne doit pas être exclusif. Ce serait méconnaître d'abord la valeur philosophique et artistique des mathématiques. De plus, des spéculations théoriques sont restées pendant longtemps éloignées de toute application, quand un moment est venu où elles ont pu être utilisées. On n'en peut pas citer d'exemple plus mémorable que le concept des sections coniques élaboré par les géomètres grecs, qui resta inutilisé pendant deux mille ans, jusqu'au jour où Kepler s'en servit dans l'étude de la planète

Mars. Si, en plus d'une occasion, les mathématiques appliquées ont donné l'impulsion en posant les problèmes, il y a en revanche des cas où le développement de la théorie pure a permis seul certaines applications que l'on n'avait pu jusque-là aborder. Il faut donc apporter dans les vues générales sur la marche de la science une grande largeur d'idées et ceci n'a rien de spécial aux sciences mathématiques; l'esprit souffle où il veut. Peu d'années après que Fourier écrivait les lignes que je viens de rappeler, apparaissait Évariste Galois qui aurait, s'il avait vécu davantage, rétabli l'équilibre en ramenant les recherches vers les régions les plus élevées de la theorie pure; ce fut un malheur irréparable pour la science française que la mort de Galois, dont le génie allait, vingt ans plus tard, exercer une action si profonde sur les parties les abstraites des mathématiques.

Parmi les applications de la théorie des équations différentielles, une des plus intéressantes et des plus importantes concerne la géométrie. En France, cette école d'analystes géomètres, pour qui les problèmes de géométrie infinitésimale sont l'occasion de belles recherches analytiques, a pour chef M. Darboux. Ses leçons sur la théorie des surfaces sont un livre classique, qui a rappelé l'attention sur des questions quelque temps négligées. Les recherches de géométrie infinitésimale ont pris un grand essor sous l'influence de ce bel ouvrage; les travaux de M. Darboux, ceux de MM. Weingarten, Bianchi, Goursat, Guichard, Kœnigs, Raffy et bien d'autres ont donné une vie

nouvelle à cette partie si importante, depuis Gauss, des sciences mathématiques, et, entre autres, la question de la déformation des surfaces s'est enrichie de résultats remarquables. Je donnerai une idée de ce genre de recherches, en énonçant un théorème élégant sur les surfaces. On sait que l'inverse du produit des deux rayons de courbure principaux en un point d'une surface s'appelle la courbure de la surface en ce point. La sphère est une surface fermée, sans singularités, à courbure constante positive; elle est la seule, comme l'a montré M. Liebmann.

Nous avons parlé tout à l'heure de l'œuvre de Sophus Lie sur la théorie des groupes de transformations, qui restera certainement un des plus beaux monuments de l'analyse mathématique au XIX[e] siècle. L'illustre géomètre en avait montré l'importance dans l'étude des équations différentielles, et ses élèves ont continué ce genre de recherches. A un tout autre point de vue, M. Picard, MM. Vessiot et Drach ont tiré parti de la théorie des groupes de transformations pour étendre à l'analyse les notions si fécondes introduites en algèbre par Galois, de telle sorte que de remarquables analogies entre la théorie des équations différentielles et la théorie des équations algébriques ont été mises en évidence.

Je ne puis terminer cette rapide revue touchant les sciences mathématiques sans dire un mot de leur partie la plus abstraite, celle où règne le nombre pur. Les célèbres recherches de Kummer, de M. Dedekind et de Kronecker sur les nombres algébriques

ont été l'origine de travaux extrêmement intéressants publiés surtout en Allemagne. Toute une arithmétique nouvelle a été fondée, où les lois de la divisibilité se présentent d'abord tout autres que dans l'arithmétique usuelle; on y voit des entiers décomposables de plusieurs manières en facteurs premiers, et ce n'est qu'en introduisant la notion des *idéaux* que M. Dedekind a pu retrouver les lois simples auxquelles nous sommes habitués. Citons encore le nom de M. Minkowski qui utilise en arithmétique les conceptions géométriques et vient de rassembler ses profondes recherches dans un livre sur la géométrie des nombres, et les noms de MM. Hilbert, Hurwitz et Frobenius auxquels la théorie des nombres et l'algèbre pure doivent d'importants progrès. Rappelons enfin que M. Lindemann, s'inspirant des profondes recherches d'Hermite sur la transcendance du nombre e, a pu établir l'impossibilité de la quadrature du cercle, proposition dont, depuis plus de deux mille ans, on cherchait en vain une démonstration rigoureuse; la démonstration, considérablement simplifiée, peut figurer aujourd'hui dans l'enseignement élémentaire de nos Universités.

IV

LA MÉCANIQUE CÉLESTE ET L'ASTRONOMIE PHYSIQUE

Nous obéissons aux habitudes en parlant ici de l'astronomie, science dont une partie a un caractère

exclusivement mathématique, et dont l'autre rentre en réalité dans la physique. L'astronomie de position ne nous éloigne pas de la théorie des équations différentielles dont nous parlions tout à l'heure. Une fois posées, les lois de la gravitation universelle, c'est-à-dire une fois admis que deux corps, dont les dimensions sont négligeables par rapport à leur distance, s'attirent proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance, et le Soleil et les planètes étant ainsi supposés réduits à des points matériels, la recherche des positions des planètes revient à l'intégration d'un système d'équations différentielles qui s'écrit aisément. Malgré leur apparente simplicité, ces équations présentent d'énormes difficultés et font depuis longtemps l'objet de l'étude approfondie des géomètres et des astronomes. Si des circonstances particulières, comme la grandeur de la masse du Soleil par rapport à celle des planètes, ne s'étaient présentées, les procédés d'intégration par approximations successives employés par les astronomes n'auraient conduit à aucun résultat; on peut donc se réjouir de l'heureux hasard auquel nous devons le magnifique épanouissement de la mécanique céleste depuis plus d'un siècle. Il est probable qu'il y a des étoiles multiples où les composants sont de masses à peu près égales; plaignons leurs habitants, s'il y en a et s'il en est qui cherchent à faire de la mécanique céleste.

Une œuvre magistrale, dont l'auteur a été prématurément enlevé à la science, il y a quelques

années, le *Traité de mécanique céleste*, de Tisserand, donne un tableau complet de l'état actuel de l'astronomie mathématique. Nous ne pouvons mieux faire que de reproduire les dernières lignes de cet ouvrage, qui résument les progrès de l'astronomie de position au siècle dernier : « La loi de Newton, dit Tisserand, représente en somme, avec une très grande précision, les mouvements de translation des corps célestes. On peut être émerveillé de voir que les inégalités si nombreuses, si compliquées et quelques-unes si considérables du mouvement de la Lune soient représentées, comme elles le sont, par la théorie. Sans doute, il reste quelque chose : dans un intervalle de deux siècles et demi environ, la Lune s'écarte peu à peu de la position calculée jusqu'à un maximum de quinze secondes d'arc, de manière que, durant ce long intervalle, le bord éclairé de la Lune passera un peu plus tôt ou un peu plus tard devant les fils d'araignée de la lunette méridienne, sans que l'avance ou le retard dépasse une seconde de temps. De même les positions des planètes, pendant un siècle et demi d'observations précises, sont représentées à moins de deux secondes d'arc près. Il y a une exception : Mercure peut être en avance ou en retard d'une quantité qui, pour certaines régions de l'orbite, s'élève à huit secondes d'arc, soit une demi-seconde de temps au bout d'un siècle. Les désaccords pour le nœud de Vénus et le périhélie de Mars sont bien moins importants. On éprouve, en fin de compte, une admiration profonde pour le génie de Newton et de ses successeurs, et pour les

immenses travaux de Le Verrier, poursuivant pendant plus de trente ans son enquête méthodique dans toute l'étendue du système solaire, travaux si habilement continués et développés par M. Newcomb ».

Il nous faut ajouter maintenant que, au point de vue théorique, le mathématicien a lieu d'être moins satisfait que l'astronome, et on peut dire que les équations de la mécanique céleste font son désespoir. Pendant quinze ans, M. Poincaré poursuivit sur ce sujet des recherches extrêmement profondes, qu'il a rassemblées dans un ouvrage ayant pour titre : *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste.* Les conclusions les plus importantes ont un caractère négatif. M. Poincaré montre que les séries employées en mécanique céleste ne peuvent être toujours convergentes et qu'on n'en peut rien tirer en toute rigueur pour la position des astres à très longue échéance ; ceci, bien entendu, n'empêche pas que, pour un temps assez limité, on ne puisse avoir confiance dans les prédictions des calculs habituels, grâce aux heureuses circonstances auxquelles j'ai fait allusion. En outre, M. Poincaré établit qu'il n'existe pas d'autres intégrales premières uniformes que celles actuellement connues. Parmi les résultats positifs dus à l'éminent géomètre, citons les solutions périodiques et les solutions asymptotiques dont il a démontré l'existence et qui permettront probablement de modifier le point de départ des méthodes d'approximations suivies aujourd'hui ; des tentatives ont déjà été faites dans ce sens pour le calcul des

perturbations de certaines petites planètes. Il est à craindre, néanmoins, que les efforts des analystes ne viennent échouer longtemps encore contre les immenses difficultés d'un problème posé cependant si nettement : les lois de la nature ne sont pas toujours simples pour les calculs des mathématiciens. En présence de ces difficultés, il n'y a certes pas lieu d'être étonné des quelques désaccords que présentent avec l'observation les théories de la Lune et de Mercure ; on peut penser que c'est à notre impuissance analytique, et non pas à la loi même de la gravitation universelle qu'il faut attribuer ces légères discordances.

Nous devons ajouter cependant qu'un progrès important vient d'être réalisé dans le problème des trois corps par M. Sundmann, et même, à un point de vue purement théorique, ce problème célèbre peut être regardé comme résolu, mais malheureusement la méthode ne semble guère utilisable pratiquement dans les calculs usuels de la mécanique céleste.

L'astronomie d'observation a fait à la physique des emprunts de plus en plus étendus. La photographie appliquée à l'astronomie est devenue un puissant auxiliaire de l'astronomie de position, en permettant d'entreprendre la carte céleste internationale. La spectroscopie avait, dès sa naissance, trouvé dans le ciel une de ses plus remarquables applications ; elle a, depuis, révélé la constitution de presque tous les astres, depuis les comètes jusqu'aux nébuleuses et même, au moyen de la méthode Döppler-Fizeau, dont nous parlerons en physique, décelé la vitesse

de leurs mouvements propres. Si la photographie et la spectroscopie ont pu ainsi changer en quelque sorte la face de l'astronomie d'observation, cela est dû, pour une bonne part, aux perfectionnements apportés à la construction des instruments, et, en particulier, à la puissance des objectifs que l'on emploie aujourd'hui. Il existe maintenant plusieurs lunettes ayant un mètre d'ouverture, et l'Observatoire du mont Wilson, en Californie, aura bientôt une lunette dont l'objectif aura 1^{m},20 de diamètre. Un examen rapide des divers corps du système solaire, puis des systèmes beaucoup plus éloignés, formés par les étoiles et les nébuleuses, nous montrera les résultats essentiels obtenus en astronomie dans ces dernières années.

Il est indispensable de connaître la forme, les dimensions et les mouvements de la Terre que nous habitons. L'Europe presque tout entière a été couverte de triangles géodésiques. Les Anglais ont triangulé l'Inde, et, au Cap, ils ont étendu l'arc de La Caille, qu'ils songent à prolonger jusqu'à la Méditerranée. La France a repris l'arc du Pérou, tandis que des missions russe et suédoise mesurent un arc au Spitzberg. Les mesures relatives à la gravité sont toujours le complément indispensable des opérations géodésiques. Tandis que jusqu'ici on s'est servi presque exclusivement dans ce but du pendule, M. Eotvos a modifié la balance de torsion, en remarquant que la pesanteur aux divers points de cette balance n'est pas la même que celle au centre de gravité autour duquel se font les oscillations, ce qui

produit un couple. Un sujet intéressant est celui de la pesanteur en mer. La méthode suivie par M. Hecker repose sur la comparaison de la hauteur barométrique qui donne la mesure de la pression évaluée en kilogrammes par centimètre carré et de la température d'ébullition de l'eau ; de celle-ci, on peut déduire la pression atmosphérique par centimètre carré, évaluée cette fois en degrés. Le rapport du gramme à la dyne donne g.

Le mouvement de translation de la Terre donne, comme on sait, naissance à ce que l'on appelle l'aberration, d'après laquelle nous ne voyons pas exactement les étoiles à leurs places réelles ; la constante si importante de l'aberration n'est pas encore connue avec la précision désirable. Dans le déplacement annuel de la Terre autour du Soleil, son axe de rotation ne reste qu'à peu près parallèle à lui-même ; ses mouvements correspondent à la précession et à la nutation, phénomènes qui produisent les variations de longitude et de latitude en chaque point de notre globe. Dans ces dernières années, aucun problème astronomique n'a suscité plus de recherches que celui de la variation des latitudes. Le mouvement en spirale du pôle sur la surface terrestre est maintenant établi, et il est hors de doute que dans les variations de latitude résultant des mouvements du pôle, il existe trois termes périodiques dont l'un, découvert par M. Chandler, est de quatorze mois environ, le second étant d'une année ; quant au troisième terme, dit terme de Kimura, il a une origine probablement météorologique. On

explique ordinairement la période de Chandler par l'élasticité du globe terrestre. Si la Terre était un solide invariable, cette période serait de 305 jours ; si elle était liquide, ou en en grande partie liquide, le phénomène ne se produirait pas ; il faut donc qu'elle soit solide, mais sans avoir une rigidité infinie. Le chiffre de la période de Chandler nous montre que la rigidité du noyau interne est comparable à celle de l'acier.

Un chapitre intéressant de la géodésie est celui des marées de l'écorce terrestre. On peut les étudier au moyen de l'observation de deux pendules horizontaux diversement orientés, qui fait connaître les variations périodiques de la verticale dues aux attractions du Soleil et de la Lune. La Terre étant élastique et déformable, ce qu'on observe n'est que la différence entre les déplacements de la verticale et ceux de la normale à la surface du sol, et l'on en peut tirer des conséquences au sujet de la déformation du globe.

Les études d'astronomie physique sur le Soleil et la Lune se poursuivent régulièrement. C'est surtout au spectroscope que nous devons nos connaissances sur la constitution physique du Soleil. Ce merveilleux instrument montre que la plupart des corps connus à la surface de la Terre existent dans le Soleil à l'état de vapeur, et même, chose singulière, il a révélé dans le Soleil l'existence de l'hélium près de trente ans avant que ce gaz fût découvert parmi les éléments terrestres. Au-dessus de la photosphère se trouve une enveloppe rose et mince qui l'entoure,

la chromosphère. Çà et là, celle-ci s'élève à de grandes hauteurs, formant ainsi les flammes qu'on appelle les protubérances. En 1868, MM. Janssen et Lockyer avaient montré qu'on pouvait les observer en dehors des éclipses ; leur spectre, contenant un grand nombre de raies brillantes, a été étudié avec soin, et MM. Hale et Deslandres ont même pu obtenir des photographies des protubérances. En interprétant, avec le principe Döppler-Fizeau, les déplacements des raies du spectre des protubérances, on a trouvé que ces flammes sont le siège de mouvements extrêmement rapides. Au-dessus de la chromosphère, se trouve la couronne, qui forme la dernière et aussi la plus mystérieuse des enveloppes solaires. On l'aperçoit seulement pendant les éclipses totales du Soleil (durant au plus six minutes), sous forme d'auréole à lumière argentée entourant le Soleil et la Lune. La couronne, n'étant observable que quelques heures par siècle [1], nos connaissances sur sa nature progressent lentement. Parmi les raies brillantes de son spectre, on remarque surtout une raie verte produite par une matière encore inconnue sur la Terre, le *coronium*. D'après les observations des dernières éclipses, M. Deslandres a pensé que la partie inférieure de la couronne tourne dans le même sens que le Soleil. Le savant astronome de Meudon a aussi fait l'application toute spéciale du principe de Döppler-Fizeau aux planètes Jupiter et

1. Le rayonnement calorifique de la couronne pourrait cependant, d'après M. Deslandres, servir à la reconnaissance de la couronne en dehors des éclipses totales.

Uranus, la rotation de cette dernière semblant, par ces recherches, être rétrograde.

La portion de la surface de notre satellite, tournée vers la Terre, commence maintenant à être connue avec une grande précision, grâce aux photographies lunaires faites par MM. Lœwy et Puiseux, avec le grand équatorial coudé de l'Observatoire de Paris. Leur magnifique atlas, représentant la Lune à l'échelle de un millimètre pour 1.800 mètres, est maintenant terminé. Plusieurs astronomes pensent actuellement que la Lune doit avoir une légère atmosphère qui aurait eu autrefois une densité beaucoup plus forte qu'aujourd'hui.

Nous avons vu les difficultés subsistant au point de vue de la théorie de la planète Mercure. Au point de vue physique, sa surface ne présentant jamais que de rares détails difficiles à saisir, on a encore quelques doutes sur la durée de sa rotation autour de son axe. Longtemps la durée admise a été d'environ vingt-quatre heures, mais, d'après les observations récentes de M. Schiaparelli, confirmées par M. Perrotin, elle tournerait sur elle-même dans le même temps qu'elle tourne autour du Soleil, soit quatre-vingt-huit jours. Quoique la planète Vénus soit l'astre le plus brillant du ciel, après le Soleil et la Lune, on sait peu de chose de sa constitution physique, sans doute à cause de son atmosphère épaisse ; la durée de la rotation est regardée par MM. Schiaparelli et Perrotin comme égale à deux cent vingt-cinq jours. Toutefois, des observations spectroscopiques récentes utilisant la méthode Döp-

pler-Fizeau, annoncées par M. Belopolsky, tendraient à la ramener à peu près a vingt-quatre heures.

Les canaux de Mars ont perdu de leur intérêt; ils sont dus à des illusions d'optique. Pour les petites planètes comprises entre Mars et Jupiter, leur nombre s'accroît sans cesse et on les découvre maintenant par la photographie. Le plus intéressant de ces astéroïdes est Éros, qui a été découvert par M. Witt, à Berlin, en 1898 ; il présente cette particularité unique de se trouver parfois entre Mars et la Terre, et de passer à une faible distance de celle-ci. On a ainsi un moyen de trouver la distance d'Éros à la Terre, et, par suite, de fixer avec une précision jusqu'ici irréalisable les dimensions du système solaire; une entente internationale s'est établie à ce sujet, entre divers Observatoires et la valeur de la parallaxe solaire a été fixée à 8″,806. Un autre événement astronomique important de ces quinze dernières années a été la découverte des 5e, 6e, 7e et 8e satellites de Jupiter. Diverses observations ont pu être faites au sujet des quatre premiers satellites; ainsi, le premier est ellipsoïdal, et sur le troisième qui, en volume, surpasse cinq fois notre Lune, on distingue nettement des neiges polaires dont l'étendue et l'intensité varient avec la saison ; il en est qui tournent autour de la planète en onze heures, comme le cinquième, tandis que la révolution du huitième est de deux ans et demi. En 1898, on découvrait sur les plaques photographiques un neuvième satellite à la planète Saturne, plus éloigné de la planète que les satellites déjà connus et paraissant avoir une

révolution rétrograde ; plus récemment encore, M. Pickering signalait sur les plaques photographiques un dixième satellite de Saturne, qui est aujourd'hui le plus faible des astres connus.

Les questions se rattachant aux comètes sont très nombreuses ; c'est un des problèmes les plus intéressants à l'ordre du jour, tant au point de vue de l'astronomie de position qu'au point de vue de l'astronomie physique et de la cosmogonie. On a pensé longtemps que les comètes venaient des espaces interstellaires et pénétraient le plus souvent en étrangères dans le système solaire pour en sortir ensuite, mais on admet maintenant qu'elles appartiennent au système solaire. La désagrégation des comètes paraît tenir surtout à l'action du Soleil et des planètes, l'action prépondérante étant celle du Soleil qui agit lentement par son attraction et plus énergiquement par sa chaleur. Des comètes aux étoiles filantes, la transition est immédiate. La parenté entre les deux espèces de corps est indéniable, et, par exemple, il n'est pas douteux que, en calculant l'orbite de l'essaim des Perséides, Schiaparelli a pu montrer l'identité de sa trajectoire avec celle d'une comète parue en 1862. Toutefois, malgré les beaux travaux de Schiaparelli, bien des questions restent ouvertes, et la désagrégation des comètes ne suffit probablement pas à expliquer comment la Terre rencontre tant d'essaims d'étoiles filantes.

Si du système solaire, nous passons au monde sidéral, nous voyons se dresser les problèmes les plus grandioses. Il est inutile d'insister sur l'impor-

tance de la photographie pour la formation d'une carte céleste et d'un catalogue d'étoiles. Ce travail immense est en excellente voie ; le catalogue qui doit renfermer les coordonnées exactes de deux à trois millions d'étoiles jusqu'à la onzième grandeur, sera même terminé d'ici peu. La carte céleste donnera, avec ses vingt-deux mille clichés, les positions de trente millions d'étoiles, avec autant de précision que pourraient le faire les meilleures observations méridiennes. Ce sera un document d'un valeur incomparable pour les recherches futures sur les transformations du monde stellaire.

Un des problèmes les plus captivants de l'astronomie stellaire est la recherche des étoiles doubles ou multiples, commencée au début du siècle dernier par le grand observateur anglais W. Herschel. L'étude du mouvement des étoiles doubles ou multiples a révélé en quelque sorte l'unité primordiale qui règne dans l'Univers, car elle a montré que, dans ces systèmes éloignés, la matière obéit aux mêmes lois de l'attraction que dans le système solaire. De plus, on a pu, en observant le dédoublement périodique de certaines raies spectrales, conclure que certaines étoiles, simples sous les plus forts grossissements, étaient doubles et animées d'un mouvement relatif orbital. Enfin, une autre classe d'étoiles doubles est formée par celles qui ont un compagnon presque obscur, dont la présence est révélée par l'irrégularité du mouvement propre de l'étoile principale : tel est le cas de Sirius dont le compagnon, jusque-là introuvable, ne fut aperçu qu'en 1862 et n'est qu'une étoile

de dixième grandeur noyée dans la lumière de l'astre principal.

Les recherches des mouvements propres des étoiles demandent de longues et pénibles mesures micrométriques, auxquelles on doit faire subir un nombre considérable de corrections, et qui souvent s'étendent sur une période de dix à vingt années. Il arrive quelquefois de rencontrer des personnes se demandant à quoi les astronomes peuvent bien employer leur temps dans les observatoires ; on comprend, d'après ces chiffres, quels labeurs et quelle patience demandent les travaux de longue haleine auxquels nous venons de faire allusion.

La mesure des distances de certaines étoiles au Soleil est un des résultats les plus frappants de l'astronomie. On connaît maintenant avec certitude, à quelques centièmes de seconde près, une cinquantaine de parallaxes. Pour les étoiles doubles, dont on connaît la parallaxe en même temps que les éléments de l'orbite, il est possible de mesurer la somme des masses de deux étoiles au moyen de la troisième loi de Kepler ; d'autre part, le rapport des dimensions des orbites autour du centre de gravité donne le rapport inverse des masses. Il est bien remarquable que les masses des étoiles qui ont pu être déterminées sont du même ordre que la masse du Soleil. Ainsi, l'étoile double la plus rapprochée de la Terre, α du Centaure, pour laquelle la lumière ne met que quatre ans et demi à nous arriver, à raison de trois cent mille kilomètres par seconde, a une masse double environ de celle du Soleil, et la

masse de chacune des deux étoiles du système est à peu près celle du Soleil; elles tournent en quatre-vingt-un ans autour de leur centre de gravité commun.

Mentionnons enfin les nébuleuses non résolubles dont on fixe aujourd'hui, avec la plus haute précision possible, la position actuelle dans le ciel. Le nombre des nébuleuses connues a considérablement augmenté, particulièrement par suite des belles observations faites depuis vingt ans par M. Bigourdan. Leur intérêt tient surtout au rôle capital que ces astres jouent dans les théories cosmogoniques, chaque nébuleuse non résoluble paraissant constituer un monde stellaire en formation. On en connaît aujourd'hui plus de douze mille : ce sont d'autres voies lactées perdues dans l'espace à des distances immenses de la nôtre et dont nous ne pouvons nous faire aucune idée.

Parmi les nébuleuses, il en est qui ont une forme en spirale. Notre voie lactée est probablement une nébuleuse spirale, comme on peut le déduire du fait que le spectre des nébuleuses spirales est une répétition affaiblie, mais point trop dénaturée du spectre solaire.

Des tentatives de coordination générale des mouvements stellaires sont actuellement très en faveur auprès des astronomes. D'après Kapteyn, il y a dans la voie lactée *deux* courants d'étoiles ayant chacun une translation d'ensemble déterminée et se pénétrant mutuellement; ces deux courants paraissent s'ignorer l'un l'autre. Aux deux essaims d'étoiles de Kapteyn, Schiaparelli adjoint un *troisième* essaim dont le Soleil ferait partie.

CHAPITRE III

Mécanique et Énergétique.

I. La mécanique classique et son histoire. — II. Les approximations successives de la mécanique. — III. De l'explication mécanique des phénomènes naturels. — IV. La science de l'énergie.

I

LA MÉCANIQUE CLASSIQUE ET SON HISTOIRE

On entend souvent répéter qu'une des grandes conquêtes de la science actuelle est d'avoir montré que les transformations du monde physique se font d'après les lois de la Mécanique. Il semble que, pour beaucoup de nos contemporains peu familiers avec le véritable esprit des méthodes scientifiques, il y ait des lois et des principes de la Mécanique qui soient au-dessus de toute atteinte. C'est là une mentalité dangereuse par le caractère trop absolu qu'elle tend à conférer à la science, oubliant que celle-ci est essentiellement mobile est n'est formée que

6

d'approximations successives. Le développement de la Mécanique est à cet égard particulièrement instructif; sans entrer dans des détails historiques minutieux qui peuvent prêter à discussion, et en se bornant aux traits généraux, on peut se rendre facilement compte des approximations successives qui ont conduit aux lois générales de notre mécanique classique actuelle et mettre en évidence les cercles vicieux apparents inséparables de la fondation de toute doctrine scientifique. Nous indiquerons en même temps les difficultés qui se sont successivement présentées et les tentatives faites pour les écarter.

Les idées d'espace et de temps absolus furent sans doute familières de bonne heure aux premiers penseurs que ne troublèrent pas, fort heureusement pour le développement de la science, nos préoccupations modernes sur ce sujet.

L'espace était celui sur lequel raisonnaient les géomètres; mouvements et équilibres étaient rapportés à la terre regardée comme immobile. L'idée de force provint de la notion de l'effort correspondant au support d'un fardeau ou à la traction d'une corde attachée à un point fixe, et sans doute on sut très tôt mesurer des actions statiques.

Nous rattachons au nom de Galilée la création de la dynamique dans un champ constant pour un point matériel. Le grand physicien, créant la cinématique des mouvements rectilignes uniformément accélérés, montra que la proportionnalité des vitesses aux temps entraîne la proportionnalité des

espaces aux carrés des temps. Il sut, par un effort génial, prouver que le plan incliné permettait de vérifier cette loi ; on ne saurait trop admirer la manière dont il établit que, pour un point pesant, la nature du mouvement est la même en chute libre et sur un plan incliné, en utilisant d'abord dans un raisonnement d'allure toute moderne le fait que les corps pesants tendent à descendre et non à monter, et rattachant ensuite le résultat qu'il a en vue à des expériences faites sur un pendule. Ses remarques sur le mouvement d'un projectile regardé comme un phénomène composé de deux mouvements indépendants l'un de l'autre joua un rôle essentiel dans l'élaboration d'un principe auquel on donna plus tard une grande généralité sous le nom de principe de l'indépendance de l'effet des forces et du mouvement antérieurement acquis.

Avec Galilée, nous étions dans un champ constant. Avec Huyghens, nous passons aux forces variables, et ses recherches sur la force centrifuge ont été capitales dans le développement de la Mécanique ; en fait, on passe des champs constants aux champs variables par une suite de sauts brusques de plus en plus petits, suivant la méthode infinitésimale des mathématiciens. La notion de masse est bien confuse pour Huyghens, mais il n'en traite pas moins un problème alors extrêmement difficile, celui du pendule composé, c'est-à-dire d'un corps solide pesant mobile autour d'un axe horizontal ; il utilise à cet effet un postulat instinctif concernant le mouvement du centre de gravité d'un système

pesant et qui revient au fond au théorème des forces vives.

On considère généralement Newton comme ayant constitué définitivement la dynamique. Il généralise le concept de force, et, quoiqu'il regarde d'une manière peu heureuse la masse comme étant la quantité de matière, il sent le premier avec netteté qu'il y a dans chaque point matériel une constante caractéristique du mouvement, différente de son poids : c'est la masse. Il semble que le concept de masse se soit introduit pour la première fois avec précision, quand on remarqua que la pesanteur peut imprimer à un même corps des accélérations différentes comme il fut reconnu par les observations du pendule de Richer, et qu'on eut rapproché de ce fait l'expérience de Newton sur les pendules formés de matières diverses; on décrit souvent cette dernière expérience en disant que, en un même lieu, tous les corps tombent avec la même vitesse dans le vide, quelle que soit la matière dont ils sont formés. La dynamique de différents points matériels dans divers champs constants s'est trouvée ainsi édifiée peu à peu, et on put écrire que la force est égale au produit de la masse par l'accélération. Le fait rappelé plus haut que, dans un même champ constant, l'accélération du mouvement produit est la même que le point matériel soit par exemple en fer ou en cuivre, est fondamental dans notre dynamique. On a émis récemment quelque doute sur sa généralité, et quelques-uns ne seraient pas étonnés qu'il ne fût pas vrai pour les corps fortement radio-

actifs, et qu'un morceau de radium tombât moins vite dans le vide qu'un morceau de fer, mais on comprend que les expériences tentées à ce sujet aient besoin d'être discutées avec un soin extrême.

Dans l'étude des champs constants, la force s'est trouvée successivement définie de deux manières différentes, d'abord par des mesures statiques, et ensuite à un point de vue dynamique par l'intermédiaire des accélérations correspondant aux champs. Aucune relation n'était *a priori* nécessaire entre ces deux évaluations, et nous devons regarder comme un résultat expérimental que les nombres représentant les forces envisagées au point de vue dynamique et au point de vue statique sont proportionnels.

Nous avons indiqué sommairement comment on avait été conduit à la relation, d'après laquelle le vecteur représentant la force est égal au vecteur-accélération multiplié par la masse; c'est l'équation fondamentale de la dynamique du point matériel. Elle appelle plusieurs remarques importantes, et il faut noter le caractère approché des expériences de Galilée et de Newton, et l'interprétation qui en a été faite tout d'abord. On partait du concept d'un espace et d'un temps absolus; quoique l'on connût le mouvement de rotation de la terre auquel on rapportait la mesure du temps, on faisait abstraction de ce mouvement dans l'interprétation des expériences relatives à la chute des graves. Il y a là une de ces approximations fréquentes dans l'histoire des sciences, où fort heureusement la petitesse des perturbations laisse un caractère simple à

un phénomène complexe. Le développement de la Mécanique aurait été tout autre si la terre avait tourné beaucoup plus rapidement autour de son axe, les expériences sur le plan incliné et sur le pendule se présentant alors avec une complication qui eût permis difficilement de formuler des principes simples. Il est bon de ne jamais perdre de vue le caractère accidentel du développement scientifique.

Il peut sembler au premier abord que la relation indiquée entre la force et l'accélération définit tout simplement la force, et on se demande alors quel intérêt elle présente. Elle ne sera en effet utile pour renseigner sur le mouvement d'un point et permettre de prédire ce mouvement, que si on connaît la force autrement que par cette relation.

Un premier cas se présente, où on utilise l'identité admise entre les points de vue statique et dynamique. C'est celui où la force peut être mesurée directement et se trouve fonction de la position du point dans le champ ; les trois équations constituent les équations différentielles du mouvement permettant, pour des conditions initiales données, de prédire celui-ci. Il peut arriver encore que la force ne puisse être mesurée statiquement d'une manière effective, mais que, pour certains mouvements particuliers du type de celui que l'on étudie, on trouve pour les composantes de la force des fonctions déterminées, en s'aidant de certaines observations. On pourra admettre qu'il en est ainsi pour tous les mouvements se produisant dans le champ, et on

retombe alors sur le cas précédent. L'histoire de la gravitation universelle offre un exemple de cette circonstance, les mouvements particuliers étant ceux des planètes autour du soleil supposé fixe, et les observations étant résumées dans les lois de Kepler.

Bien d'autres cas pourraient être examinés, mais ceci suffit à mettre en évidence que l'équation fondamentale de la dynamique du point matériel, qui a trouvé son origine dans certaines expériences très particulières relatives à des champs constants, constitue seulement un moule dans lequel nous cherchons à enfermer la représentation analytique des phénomènes, moule qui va s'étendre aux systèmes matériels. Il ne faut pas se payer de mots. Quand on parle de cette loi générale du mouvement, rien n'en peut mieux fixer le sens exact que son histoire et quelques exemples de son application, comme nous venons essayer de le faire.

Je parlais tout à l'heure de cercles vicieux apparents qui se présentent dans l'histoire des sciences; ces cercles vicieux, tels seulement pour un esprit d'une logique trop absolue, ne sont que la conséquence du progrès dans les approximations successives qui forment la Science. Il est facile de se donner le plaisir d'en citer des exemples. Ainsi Newton ayant, par une extension hardie, tiré des lois de Kepler les lois de la gravitation universelle, une conséquence de ces dernières lois fut de montrer que la troisième loi de Kepler ne pouvait être exacte. C'est que le Soleil avait été supposé d'abord immo-

bile, et que, étudiant ensuite la question d'une manière plus générale, on considéra le Soleil comme lui-même en mouvement par rapport aux étoiles fixes (qui elles-mêmes d'ailleurs sont mobiles). Mais, heureusement pour nous, les masses de toutes les planètes sont très petites par rapport à la masse du Soleil, et les lois de Kepler sont très approchées ; c'est grâce à cette circonstance favorable de très petits rapports de masses qu'il a été possible d'arriver aux lois de la gravitation universelle.

Il y a des étoiles doubles, dont on connaît la distance à la Terre et pour lesquelles il a été possible de mesurer les masses des composantes, que l'on a trouvées sensiblement égales. Tout porte à penser qu'il existe de même des systèmes triples d'étoiles pour lesquels les masses sont aussi du même ordre de grandeur. Pour les habitants de ces astres éloignés qui cherchent à faire de la mécanique céleste, il n'y a pas d'astre dominant avec les lois de Kepler, et il n'y a pas une première approximation dont ils puissent partir. Les choses doivent leur paraître d'une effroyable complication, si tant est que la mesure de la simplicité soit la même pour leur intelligence que pour la nôtre.

L'attraction de deux masses rentre dans le type de ces forces considérées plus haut, dont la loi est fournie par certaines observations particulières et ensuite généralisée. A ce point de vue la question se pose à peine d'approfondir la nature de l'attraction; l'essentiel est de pouvoir la mesurer statiquement comme l'a fait Cavendish avec sa balance.

Cette attraction à distance est cependant pour les physiciens un grand scandale; il est dans l'esprit de la physique moderne que les actions doivent s'exercer par l'intermédiaire d'un milieu, et il est étrange que l'attraction paraisse faire exception. On pourrait évidemment se demander s'il y a une bien grande différence au point de vue des principes, entre une action à très petite distance et une action à grande distance; mais on croit s'entendre suffisamment quand on distingue entre les actions moléculaires et les actions à distance sensible.

Quoi qu'il en soit, des théories dans le genre de celles de Lesage, qui attribuait l'attraction aux impulsions communiquées aux corps par les particules d'un milieu très subtil sont pleines d'intérêt, mais d'aucune d'elles on ne peut tirer jusqu'ici de conséquences susceptibles d'une vérification expérimentale. L'attraction reste une force étrange qui ne semble pas avoir de propagation et n'est altérée ou déviée par aucune substance connue. Il n'y a pas d'écran pour la gravitation; la découverte d'un tel écran aurait d'immenses conséquences, tant au point de vue pratique qu'au point de vue théorique. Seul le héros d'un roman de H. Wells, *Les premiers hommes dans la lune*, a connu une substance imperméable à l'attraction qui lui permit, au moyen d'une sphère enduite de cette substance, de se rendre dans notre satellite où il a laissé son secret.

Avant d'arriver à cette substance merveilleuse, on résoudra sans doute d'autres problèmes moins lointains. Ainsi M. Eotvos a cherché à résoudre avec sa

balance de torsion une question d'une importance capitale pour la philosophie naturelle : la constante de la gravitation est-elle la même pour tous les corps? Si elle ne l'était pas, la direction de la verticale ne serait pas non plus la même pour tous les corps, puisque la pesanteur observée est la résultante de deux forces : 1° l'attraction, qui pour deux corps différents aurait même direction, mais intensité différente; 2° la force centrifuge qui aurait même direction et même intensité pour tous les corps. Cette déviation de la verticale pourrait être mise en évidence par la balance de torsion. L'observation a montré que, si la différence existe, la différence est plus petite que $\frac{1}{200.000.000}$; on peut donc regarder comme établie, au moins avec nos moyens de mesure actuels, l'unicité de la constante de la gravitation.

II

LES APPROXIMATIONS SUCCESSIVES DE LA MÉCANIQUE

L'ensemble des travaux de Galilée, de Huyghens et de Newton avait conduit à regarder que les circonstances déterminantes du mouvement produisent des accélérations. On fut ainsi conduit à poser en principe que la rapidité avec laquelle change l'état dynamique d'un système isolé dépend d'une manière déterminée de son état statique seul. Il fut donc postulé, plus ou moins explicitement, que les chan-

gements infiniment petits qui surviennent dans un système isolé dépendent uniquement de l'état actuel de celui-ci, c'est-à-dire que les accélérations de ses divers points sont des fonctions (que des lois physiques font connaître pour chaque catégorie de phénomènes) des coordonnées de ces points. Ces relations constituent les équations différentielles du mouvement du système, et le produit de la masse par l'accélération qu'elles font connaître représente la force agissant sur le point, provenant des autres parties du système; on a, dans chaque cas particulier, à discuter la possibilité de la mesure statique de ces forces.

On supposa en outre que tous les systèmes isolés sont conservatifs, en entendant par là qu'il y a pour l'ensemble des forces un potentiel dépendant uniquement de la position relative de ses diverses parties et que, par suite, la force vive du système (produit de la somme des masses par les carrés des vitesses) est une fonction de même nature. D'ailleurs cette hypothèse permet à elle seule de retrouver les expressions des accélérations en fonction des coordonnées si on admet, *et c'est là un point capital*, que, à un moment donné, on peut se donner arbitrairement la position et la vitesse des points du système, de sorte que dans le mouvement de notre système de n points, il y ait $6n$ constantes arbitraires.

Ainsi se trouvèrent peu à peu élaborés les principes généraux de notre mécanique classique, et il est essentiel de remarquer que, dans ces conditions, les équations du mouvement ne changent pas si, dési-

gnant le temps par t, on change t en $-t$, car seules les dérivées secondes figurent dans les relations.

Nous avons supposé le système isolé. Un système non isolé S fait partie d'un système isolé plus vaste Σ, et l'on peut concevoir les équations précédentes relatives au système total Σ. Dans la partie de ces équations relatives aux points de S figureront des forces provenant de Σ sur ces points; c'est là un embarras considérable pour former les équations du mouvement S seul. Souvent les forces provenant des parties de Σ extérieures à S pourront être regardées *pratiquement* comme ne dépendant que des coordonnées des points de S, et nous aurons alors le système S se déplaçant dans un champ de forces extérieures, fonction des coordonnées de ces points; les équations du mouvement S seront de même forme que plus haut. Le système isolé formé par un point pesant et la Terre en offre l'exemple le plus simple, quand on traite du mouvement de ce point en regardant comme constant le champ de la pesanteur.

Les équations du mouvement sont susceptibles d'une forme différente, quand la position du système, par suite de certaines liaisons, dépend seulement d'un nombre p de paramètres moindres que $3n$, et que les forces provenant de ces liaisons sont regardées comme ayant un potentiel constant. On aura alors un système de p équations; la solution générale dépendra de $2p$ constantes arbitraires, qui pourront être les valeurs des paramètres et de leurs dérivées premières à un moment donné. Ici, comme

plus haut, les équations ne changeront pas, quand on changera t en $-t$, c'est-à-dire que l'*on renversera le mouvement en changeant le sens des vitesses.* On pourra alors *remonter le cours du temps*, conclusion bien grave sur laquelle nous reviendrons tout à l'heure.

Nous venons de dire les lois générales de ce que nous avons appelé la mécanique classique. Le principe fondamental d'où elles découlent, est, comme nous l'avons vu, que les changements infiniment petits à partir d'une position dépendent seulement de l'état statique actuel. Or, on aperçoit de suite des exceptions, au moins apparentes, à ce principe. Nous voyons constamment autour de nous des mouvements s'éteindre par suite de résistances passives, telles que la viscosité et le frottement; ce sont là les cas les plus simples où le principe ne paraît pas pouvoir être conservé. Souvent, on se tire pratiquement de la difficulté, en ajoutant des forces ne dépendant pas seulement de la position. Ainsi, pour un corps en mouvement dans un fluide, on ajoutera des forces dépendant de la vitesse, dont des expériences auront déterminé la loi dans certains cas particuliers; telle est pour un corps dans l'air la résistance proportionnelle au carré de la vitesse dans des limites assez étendues. Pour deux corps solides frottant l'un contre l'autre, on ajoutera une force tangentielle dite de frottement, qui rend dans la pratique de grands services, mais sur laquelle nous ne sommes guère plus renseignés aujourd'hui qu'au temps de Coulomb qui en a fait connaître les

lois encore admises. Il est même singulier, notons-le incidemment, que des études nouvelles n'aient pas été tentées sur un sujet aussi important, avec toutes les ressources qu'offre l'expérimentation moderne, de façon à nous faire sortir d'un empirisme par trop grossier.

Quoi qu'il en soit, si, au point de vue des applications, nous pouvons nous en tirer plus ou moins heureusement par l'introduction de forces d'une autre nature, s'ensuit-il que nous devons rejeter définitivement le principe fondamental? C'est là une grave question que nous devons examiner.

On peut soutenir que les exemples cités ne sont pas en opposition avec le principe fondamental de la dynamique classique. Dans le cas d'un corps en mouvement dans un fluide, en portant notre attention seulement sur le corps, nous sommes bien obligés d'introduire des forces dépendant des vitesses, mais il n'en serait plus nécessairement de même si nous considérions l'ensemble du corps et du fluide. Les molécules du fluide situées en avant du corps sont, peut-on dire, beaucoup plus rapprochées les unes des autres que les molécules placées en arrière, et c'est cette configuration qui règle le mouvement. Il est de même dans le cas du frottement; les forces de frottement ne seraient que des forces apparentes. Ici encore, nous portons notre attention sur un trop petit nombre d'éléments; l'introduction d'un plus grand nombre de variables, par exemple d'éléments relatifs aux déformations des corps en contact qui sont dissymétriques par rapport

au mouvement, pourrait montrer encore que celui-ci est réglé à chaque instant par l'état statique.

Je généraliserai et préciserai ces vues particulières en reprenant les équations différentielles de la dynamique classique avec les p paramètres dont dépend la position du système. Je suppose que ces paramètres puissent se partager en deux groupes, les uns correspondant à des variables *visibles* que nous pouvons mesurer et sur lesquelles nous pouvons avoir action, les autres étant des variables *cachées*, échappant à nos mesures, et sur lesquelles nous ne pouvons agir; soit q le nombre des premières ($q<p$). Nous devons regarder que l'intégrale des équations différentielles du mouvement ne dépend pas ici de $2p$ arbitraires, mais seulement de $2q$; car, à un instant déterminé, nous disposons seulement des variables visibles et de leurs dérivées premières.

On comprend alors que tous les mouvements, possibles pour nous, puissent dans certains cas s'éteindre. Une grosse difficulté se trouve ainsi écartée relativement au changement de t en $-t$ dans les équations. Il reste toujours que les équations ne sont pas modifiées par ce changement, mais *il n'est pas possible néanmoins de remonter le cours du temps*, car nous ne pouvons, à un moment donné, changer le signe de toutes les dérivées premières, puisqu'il y en a $p-q$ dont nous ne disposons pas. Il n'est donc pas impossible qu'*un système irréversible puisse être conservatif* et obéisse aux lois générales de la mécanique classique.

De telles considérations ne plaisent pas, je le sais,

à beaucoup de physiciens qui les trouvent arbitraires et infécondes. Je ne crois pas cependant qu'on puisse systématiquement refuser d'introduire des variables cachées ou des masses cachées, comme disaient Helmholtz et Hertz. L'éther qui est formé de masses cachées joue un rôle essentiel en optique et en électricité, et que deviendraient les chimistes sans les atomes et les molécules qui sont, eux aussi, des masses cachées. L'introduction de variables cachées peut sans doute être délicate, mais de toutes parts, surtout en électricité, nous voyons aujourd'hui s'introduire de tels éléments, et il ne semble pas que ce labeur ait été infécond.

Il se pourrait même que certaines variables *cachées* devissent des variables *visibles*, grâce aux perfectionnements des méthodes de mesures, et il est loisible de faire le rêve que notre puissance sur les choses s'agrandira à mesure que q se rapprochera de p; nos approximations en mécanique deviendront ainsi de plus en plus serrées. Le cas chimérique, où p serait égal à q, nous ramènerait à la réversibilité complète; nous pourrions alors remonter le cours du temps.

III

DE L'EXPLICATION MÉCANIQUE DES PHÉNOMÈNES NATURELS

Que doit-on entendre *par explication mécanique des phénomènes?* C'est une question sur laquelle on est loin d'être d'accord. Si on adopte les points de

vue qui précèdent, regardant tous les systèmes isolés comme conservatifs, il ne peut y avoir hésitation. On aura l'explication mécanique d'un phénomène quand on sera arrivé, par l'introduction de variables visibles et cachées convenables, à le regarder comme faisant partie d'un système conservatif plus ample. Cette réponse est précise, mais elle incite à poursuivre un but peut-être chimérique et reste, en tout cas, très théorique. Si on veut une réponse plus pratique, il faut se contenter d'à peu près, comme on le fait le plus souvent.

Aux forces de la mécanique classique, on ajoute des forces du type des actions dues aux viscosités et aux frottements dont la loi est déterminée par un empirisme plus ou moins grossier, les équations formées avec cette addition permettent alors d'étudier le mouvement, et on dit, c'est là le sens le plus ordinaire de l'expression, que l'on a une explication mécanique. Pour voir sous son vrai jour ce que peut recouvrir ce mot d'explication et ne pas se faire d'illusions, il suffit de se reporter à certains problèmes de frottement, surtout quand il y a des roulements dont les lois sont si mal connues.

Revenant au point de vue théorique, on peut se demander si on ne pourrait pas généraliser la dynamique classique, en la rendant plus compréhensible. C'est ce qu'avait déjà cherché Laplace au commencement de la *Mécanique céleste*. Au lieu d'admettre que l'impulsion de la force est proportionnelle à la vitesse, il suppose qu'elle soit une certaine fonction de la vitesse. Les principes généraux du

mouvement se présentent alors sous un nouveau point de vue ; ce que nous avons appelé la masse dépend en général de la vitesse, et cette conséquence n'est pas pour déplaire aujourd'hui où on croit entrevoir des cas où la masse varie avec la vitesse, quand celle-ci se rapproche de la vitesse de la lumière. Dans cette dynamique généralisée, le principe de l'énergie subsiste en modifiant convenablement la définition de la force vive [1].

Dans toute cette étude, les lois exprimant nos idées sur le mouvement se sont trouvées condensées dans des équations différentielles, c'est-à-dire des relations entre les variables et leurs dérivées. Il ne faut pas oublier que nous avons en définitive formulé un principe de *non-hérédité*, en supposant que l'avenir d'un système ne dépend à un moment donné que de son état actuel ou d'une manière plus générale (si on regarde les forces comme pouvant aussi dépendre des vitesses) que cet avenir dépend de l'état actuel et de l'état infiniment voisin qui précède. C'est une hypothèse restrictive et que, en apparence au moins, bien des faits contredisent. Les exemples sont nombreux, où l'avenir d'un système *semble* dépendre des états antérieurs; il y a hérédité. Dans des cas aussi complexes, on se dit qu'il faudra peut-être abandonner les équations *différentielles* et envisager des équations *fonctionnelles*, où figureront des intégrales prises depuis un

1. Dans un ouvrage remarquable, MM. E. et F. Cosserat ont repris les idées de Laplace, en leur donnant une très grande extension.

temps très lointain jusqu'au temps actuel, intégrales qui seront la part de cette hérédité; j'en ai dit un mot dans le chapitre précédent. Les tenants de la mécanique classique pourront cependant prétendre que l'hérédité n'est qu'apparente, et qu'elle tient à ce que nous portons notre attention sur un trop petit nombre de variables. Il en sera ici comme il en était plus haut, mais dans des conditions plus complexes encore.

On voit assez, par ce qui précède, les difficultés que présente la notion d'explication mécanique des phénomènes naturels. Il est nécessaire de les constater, car avant tout le savant ne doit pas se laisser abuser par les mots. Mais il n'y a pas là matière à découragement. Bien au contraire, il est vraiment extraordinaire que, au milieu de la complexité des apparences, l'homme ait pu, servi par d'heureux hasards dont nous avons signalé quelques-uns chemin faisant, arriver à débrouiller, superficiellement au moins, un tel chaos. Le passé répond de l'avenir. Après les premières approximations en viendront d'autres d'ordre plus élevé nous rapprochant du but idéal, dont l'homme de science a le sentiment, et auquel il croit sans pouvoir d'ailleurs le définir avec précision.

IV

LA SCIENCE DE L'ÉNERGIE

Nous venons de voir les difficultés que l'on rencontre quand on veut préciser la notion d'explica-

tion mécanique des phénomènes naturels. Quoi qu'il en soit de ces difficultés, le désir impérieux de chercher de telles explications a été, pour le développement de la science, un stimulant d'une très grande fécondité; nous nous en rendrons compte quand nous jetterons un coup d'œil sur les progrès récents de l'optique et de l'électricité. On se priverait incontestablement d'une arme puissante en renonçant à ces tentatives d'explications mécaniques qui ont rendu tant de services. Il faut, toutefois, reconnaître que, dans plusieurs cas, les contradictions et les bizarreries de quelques théories ont amené une sorte de découragement, et que les savants d'aujourd'hui n'ont plus, à ce point de vue, l'enthousiasme des physiciens géomètres de la première moitié du siècle dernier. Il a pu même paraître à quelques-uns qu'il était étrange d'expliquer le connu par l'inconnu, le visible par l'invisible, d'imaginer par exemple, comme on l'a dit, un éther que nul œil humain ne verra jamais. Une telle accusation est justifiée, si on prend le mot d'explication dans le sens où il a été longtemps employé; mais elle perd de sa force si on ne cherche dans une explication qu'une image utile et féconde, et si on n'a pas la prétention d'atteindre la réalité, comme je l'ai déjà dit bien des fois. La science peut suivre à la fois des voies diverses, et la multiplicité des points de vue est non seulement légitime, mais indispensable.

Ceci dit, certaines lois ou hypothèses physiques, qui ne sont que la généralisation de faits observés,

jouent aujourd'hui un rôle essentiel; elles ont pour objet d'établir des relations numériques définies entre des grandeurs directement mesurables. Parmi ces lois, celles de l'énergétique sont fondamentales dans la science de notre époque. La thermodynamique a été, en quelque sorte, l'embryon de l'énergétique, qui la comprend comme cas particulier; deux noms dominent la thermodynamique, ceux de Mayer et de Carnot, et des deux le plus grand est assurément celui de Sadi-Carnot, précurseur prodigieux qui, par ses vues géniales, devança considérablement son temps. La fécondité, dans toutes les parties de la physique, du principe de la conservation de l'énergie a été surtout mise en évidence par Helmholtz et par lord Kelvin. Dans chaque cas particulier on est amené à définir ce que l'on entend par énergie : c'est ainsi qu'on distingue les énergies mécanique, calorifique, électrique, chimique, radiante, etc., énergies qui se présentent, en général, sous la forme d'un produit de deux facteurs. Avec les formes d'énergie jusqu'ici cataloguées, si je puis dire, le principe de la conservation est vérifié pour tous les phénomènes connus, et le fait que l'on a eu seulement besoin d'introduire un nombre très limité de formes d'énergie constitue la grande importance de cette loi fondamentale. Sous sa forme générale, le *principe de l'énergie* exprime que les différentes formes de l'énergie *interne*, la force vive sensible, le travail accompli et l'énergie cédée (sous forme calorifique, électrique, magnétique, etc.) se transforment les unes dans les autres de manière à avoir une varia-

tion totale égale à zéro. La notion d'*énergie interne* est capitale; s'il n'y a en jeu que des énergies mécaniques et calorifiques, l'énergie interne est une fonction de la disposition relative des différentes parties du système et de leur état physique et chimique.

On devra peut-être un jour introduire d'autres formes d'énergies que celles jusqu'ici considérées, et alors en un certain sens on pourrait être tenté de regarder le principe de la conservation de l'énergie comme une définition; mais il est clair que si, pour satisfaire à cette définition, il fallait envisager un trop grand nombre de formes d'énergie, le principe cesserait d'exister pour le physicien qui n'en pourrait rien tirer. Quoique nos idées sur la conservation de l'énergie aient leur origine historique dans le théorème des forces vives de la mécaniqne rationnelle et qu'un lien se soit trouvé ainsi établi entre la mécanique rationnelle et la physique, ces premiers points de vue sont généralement abandonnés aujourd'hui. L'expérience reste le seul guide dans cette question pour chaque forme d'énergie. Il y a un équivalent mécanique de la chaleur, mais il n'y a pas d'équivalent de l'électricité, car la même quantité d'électricité produit, suivant les circonstances, un travail très différent; il y a, par contre, un équivalent mécanique de l'énergie électrique.

Pour toute une école de savants, l'énergie n'est pas seulement une conception abstraite sans existence réelle; elle a pour eux, comme la matière, plus peut-être que la matière, une existence objec-

tive, et nous ne pouvons ni la créer ni la détruire. De l'équivalence des différentes formes de l'énergie, peut-on conclure à leur identité? La question, pour l'expérimentateur, n'a pas de sens; c'est un peu comme si on demandait si deux corps sont identiques parce qu'ils ont le même poids. La question pour l'*énergie* est plus singulière encore que pour la *matière*, et chacun peut y répondre diversement suivant ses vues théoriques.

Le déplacement de l'énergie est la condition essentielle de l'existence des phénomènes; or, toutes les formes connues de l'énergie ont une tendance à se transformer en énergie calorifique, qui se présente comme la forme la plus stable. Ainsi, on peut transformer entièrement du travail mécanique en chaleur versée dans une même source, mais il n'est pas possible de réaliser la transformation inverse. D'abord, le principe de Carnot nous apprend qu'une certaine quantité de chaleur ne peut abandonner une source pour se transformer entièrement en travail, ce qui suffit déjà à montrer dans la chaleur une forme inférieure de l'énergie; toutefois, si la transformation est réversible, il y a une sorte de compensation puisque, si une partie de l'énergie est dégradée, une autre se trouve élevée. Mais, quand la transformation est irréversible, il y a une dégradation définitive sans compensation. Ainsi, dans un système soustrait à toute action extérieure et passant par voie irréversible d'un état à un autre, la quantité d'énergie est bien constante, mais la quantité d'énergie *utilisable par nous* pour produire du travail

diminue : la *qualité* de l'énergie a diminué. Un tel résultat est produit par le frottement qui rend une transformation irréversible, par des chutes de chaleur par conductibilité, ou rayonnement entre les diverses parties du système, par la résistance des conducteurs dans la propagation de l'électricité, par l'hystérésis dans les phénomènes magnétiques, etc. Dans son bel ouvrage sur les principes de la chimie physique, M. Perrin regarde, avec M. Langevin, le principe de Carnot comme *un principe d'évolution* et l'énonce en disant qu'un *système isolé ne passe jamais deux fois par le même état.* Il faut dire cependant que cet énoncé a un caractère beaucoup plus général que le principe classique de Carnot. On tend d'ailleurs de plus en plus aujourd'hui à regarder, conformément aux idées de Boltzmann et de Gibbs, le principe de Carnot comme une loi de probabilité s'appliquant à des systèmes suffisamment complexes, et d'ailleurs pendant un temps qui n'est pas très long. Il y aura donc des cas où il faudra l'appliquer avec prudence, et il est clair que, dans ces conditions, il faut se garder de généralisations hasardeuses.

Aussi, tout en admirant l'imagination de Clausius et de lord Kelvin et en réservant pour le savant le droit d'être poète à son heure, faut-il ne pas accepter sans réserve les conclusions philosophiques que les deux grands physiciens ont déduites par une gigantesque extrapolation de la loi de la dégradation de l'énergie. Il est exagéré de déduire de principes expérimentaux, dont les vérifications sont bien limitées, des

vues générales sur l'avenir de l'Univers. Disons seulement que la thermodynamique n'est pas en opposition avec cette idée que l'Univers marche fatalement dans un sens déterminé, les énergies utilisables s'usant incessamment. Des êtres aux facultés plus aiguisées que les nôtres pourraient-ils s'opposer à cette dissipation de l'énergie? Sauraient-ils agir sur les variables *cachées* de manière à faire machine en arrière? Il leur faudrait la subtilité du petit démon de Maxwell qui pourrait suivre les molécules dans leurs courses.

Cette dégradation est-elle compatible avec une explication mécanique? C'est un point que j'ai examiné plus haut et sur lequel je n'ai rien à ajouter; pour M. Boltzmann, le principe de Carnot, sans être identique au principe de la moindre action, présente avec lui une certaine analogie. Si des tentatives comme celles d'Helmholtz et de Boltzmann sont d'un grand intérêt pour les géomètres, il faut reconnaître que beaucoup de physiciens s'en désintéressent aujourd'hui. Pour plusieurs d'entre eux, les équations de la physique sont des relations quantitatives entre des grandeurs, dont on ne dit pas si elles sont ou non qualitativement irréductibles. J'ai déjà écrit plusieurs fois le mot de *qualité*. Le principe cartésien que tout, dans le monde matériel, s'explique par l'étendue et le mouvement, serait-il abandonné aujourd'hui? Il semblerait que oui, au moins partiellement, quand on entend dire que la chaleur est une forme *dégradée* de l'énergie. Mais il ne faut pas oublier que *quantité* et *dégradation* sont

choses relatives à nos possibilités d'action. Nous nous sommes arrêté tout à l'heure sur le mot d'explication mécanique; il a des malléabilités infinies, et nous avons dit qu'on peut donner à la notion du mécanisme un sens très large permettant de concilier bien des contradictions.

La thermodynamique a été l'origine de l'énergétique; aussi celle-ci, à sa naissance, a-t-elle été envahie par un certain nombre de points de vue spéciaux à la thermodynamique, et règne-t-il encore aujourd'hui quelque confusion dans l'exposition des principes généraux de l'énergétique. Depuis quelques années, à la suite des travaux de Gibbs et de Helmholtz, le rôle d'une fonction importante, le potentiel thermodynamique, a été mis en lumière par divers physiciens, parmi lesquels je dois citer tout particulièrement M. Duhem. Ce potentiel thermodynamique donne la mesure de ce que Carnot appelait la puissance motrice. En France M. Le Chatelier, en Allemagne M. Ostwald, reprennent aujourd'hui les points de vue de Carnot en partant de la notion de la puissance motrice, c'est-à-dire de l'aptitude de chaque phénomène à exercer une action sur le monde extérieur; c'est aussi ce que Helmholtz appelait l'énergie libre. Une définition générale est ici impossible comme pour l'énergie, mais, dans chaque cas particulier, on reconnaît que, si deux systèmes de corps sont en présence, il y a échange d'une certaine propriété qui est perdue par l'un des systèmes et gagnée par l'autre, celle de pouvoir se transformer directement, soit isolément, soit en pro-

voquant dans un autre système une transformation inverse; c'est cette propriété qu'on appelle la puissance motrice.

On peut énoncer à ce sujet quelques lois générales. On a d'abord la loi de conservation de la capacité de puissance motrice d'après laquelle, dans toute dépense de puissance motrice, il y a une fonction de changements corrélatifs de même nature qui reste constante, fonction que fait connaître l'expérience; il n'en est pas ainsi toutefois dans les phénomènes irréversibles pour la chaleur, qui constitue une exception parmi les diverses espèces de puissance motrice. Une seconde loi de l'énergétique consiste dans l'impossibilité de créer de la puissance motrice sans en dépenser ailleurs, elle est la généralisation de l'impossibilité du mouvement perpétuel. Enfin, d'après une troisième loi générale, il est impossible de détruire de la puissance motrice sans créer de la chaleur : c'est, au fond, la loi de Joule. On comprend d'ailleurs que les principes expérimentaux auxquels on rattache les lois générales de l'énergétique puissent être choisis de différentes façons, et à cet égard les intéressants travaux de M. Mouret et du commandant Ariès méritent d'être cités.

Il importe aussi de prévenir toute illusion sur le degré d'utilité à tirer des lois générales de l'énergétique. Leur utilité est en quelque sorte qualitative, elle consiste à prévoir le sens d'un phénomène et à déduire d'une première loi trouvée expérimentalement une proposition réciproque; par exemple, de

l'électrisation des cristaux hémièdres par compression, M. Lippmann déduit la déformation des cristaux produite par l'influence électrique. Mais, pour avoir des évaluations qualitatives, il faudra faire intervenir des lois spéciales aux phénomènes étudiés; ce n'est qu'ainsi que la science de l'énergie peut être féconde. Nous en verrons de nombreux exemples en analysant les principaux chapitres de la physique, de la chimie et de la physico-chimie.

On a pu voir dans ce chapitre les deux principales tendances entre lesquelles se partagent aujourd'hui les savants qui étudient la nature inanimée, depuis les théoriciens qui cherchent des explications mécaniques jusqu'aux expérimentateurs qui se méfient des notions abstraites et supprimeraient même avec plaisir le mot d'entropie du vocabulaire scientifique. Ces tendances extrêmes sont radicalement opposées dans leur esprit, mais pratiquement il y a entre elles bien des ponts, et, dans la recherche, le partisan le plus convaincu de l'énergétique purement expérimentale n'hésite pas à faire parfois certaines représentations dont le caractère est en désaccord avec ses propres idées. Cela est fort heureux; ce n'est qu'en adoptant des points de vue divers, quelquefois opposés, que les sciences progressent. Ne mutilons pas l'esprit humain dans la tâche immense qu'il a à accomplir. Nous allons retrouver ces directions diverses dans tout le développement des sciences physico-chimiques.

CHAPITRE IV

La Physique de l'Éther.

I. L'Optique. — II. L'Optique et l'Électricité. — III. Les rayons cathodiques et les rayons X. — IV. Les nouveaux rayonnements et la mécanique des électrons. — V. Le principe de relativité.

I

L'OPTIQUE

Nous allons examiner rapidement quelques-uns des travaux les plus importants se rapportant aux diverses parties de la Physique et de la Chimie. Commençons par l'optique et l'électricité, où des découvertes inattendues sont venues, dans ces derniers temps, frapper l'attention des personnes les plus étrangères aux progrès des sciences. Nous plaçant ici à un point de vue général, nous ne pouvons songer à entrer dans les détails et nous devons surtout insister sur les idées générales concernant la philosophie naturelle, auxquelles conduit l'ensemble des faits observés.

L'optique et l'électricité sont la physique de l'éther. On sait que les physiciens considèrent la lumière comme un ébranlement périodique d'un milieu élastique, l'éther, qui remplit l'espace et pénètre les corps. Cette image d'un milieu rentrant dans la catégorie des masses cachées, dont nous parlions avec Helmholtz et Hertz, rend bien compte de la grande majorité des phénomènes observés, et si, en quelques points, des difficultés subsistent, l'ensemble de la théorie élastique n'en forme pas moins un admirable monument. La lumière visible correspond à des vibrations dont le nombre varie, quand on passe de l'infra-rouge au violet extrême, entre quatre cents et huit cents trillions par seconde; la longueur d'onde d'une radiation déterminée la définissant complètement et demeurant en général identique à elle-même, on a tout naturellement pensé à en faire un étalon de longueur. Son seul inconvénient est son extrême petitesse, et il a fallu une grande ingéniosité, pour évaluer le mètre en longueur d'onde, à M. Michelson qui a effectué ce beau travail au Bureau international des poids et mesures, et a exprimé le mètre en fonction de la longueur d'onde de la raie rouge du spectre du cadmium.

On a été longtemps avant de produire des ondes lumineuses stationnaires analogues à celles que présentent, par exemple, en acoustique, les tuyaux sonores; c'est en cherchant la solution de ce problème que M. Lippmann a pu effectuer la photographie des couleurs. Dans un ordre d'idées plus théorique, la même question a permis à M. Wiener

ae montrer que, dans un rayon polarisé la direction des vibrations lumineuses est perpendiculaire au plan de polarisation, si toutefois on admet, comme l'a fait remarquer M. Poincaré, que l'impression photographique résulte de la force vive du mouvement vibratoire de l'éther, en se laissant guider par l'analogie avec l'acoustique. L'éther, qui remplit le vide, pénètre aussi l'intérieur des corps, et ce n'est pas une des moindres difficultés de la théorie que de se rendre compte des propriétés de ce milieu élastique à travers lequel se meuvent les corps célestes. L'étude des phénomènes optiques dans les corps en mouvemen' a fait l'objet de recherches délicate qui ne sont pas définitives. Dans cet ordre de questions, le premier phénomène est celui que les astronomes appellent l'aberration de la lumière, et d'après lequel, par suite du mouvement de la Terre, une étoile n'est pas vue dans sa véritable direction, mais suivant une direction inclinée sur celle-ci dans le sens du mouvement terrestre. Pour expliquer l'aberration de la lumière, il faut supposer qu'il y a un entraînement partiel de l'éther par la matière. Les vues théoriques de Fresnel, à ce sujet, ont été confirmées par une expérience mémorable de Fizeau, reprise avec succès en Amérique, expérience dans laquelle on mesure la différence de phase qu'ont acquise deux rayons lumineux à la sortie de deux tubes parallèles qu'ils ont parcourus à la fois dans le même sens, tandis que deux courants d'eau rapides parcouraient les tubes dans des sens opposés.

On a cherché si le mouvement de translation de la

Terre pouvait être mis en évidence au moyen de phénomènes optiques réalisés à la surface terrestre; les résultats ont été négatifs. Dans toutes ces expériences, les termes de l'ordre du carré de l'aberration étaient négligeables et la théorie en rend bien compte à ce degré d'approximation. Il y a cependant une expérience récente de M. Michelson, dont le résultat aussi a été négatif, et où les termes de l'ordre du carré de l'aberration sont sensibles : c'est une expérience d'interférence de deux rayons lumineux qui se sont propagés à angle droit. Cette expérience joue un rôle important dans l'histoire du principe de relativité dont nous dirons un mot plus loin.

Il n'est pas facile de se rendre compte de la nature de l'éther, en cherchant à faire des comparaisons avec les milieux qui nous sont familiers. Plusieurs pensent que c'est là un effort inutile, *qu'il est même puéril d'expliquer le simple par le composé, et que c'est l'inverse qu'il faut faire, c'est-à-dire expliquer la matière par l'éther*. Il y a cependant encore des mécaniciens, tout à fait classiques, aimant par-dessus tout les représentations cinématiques et cherchant dans le visible une représentation de l'invisible. De ce nombre est M. Boussinesq, dont les beaux travaux sur la mécanique des fluides et sur l'élasticité ont rendu le nom illustre; il aime à rattacher les théories qu'il développe sur l'éther à des expériences hydrodynamiques, comme celles de Du Buat, sur la résistance opposée par l'eau au mouvement d'un pendule. L'éther paraît, à première vue,

jouir de propriétés contradictoires, puisque, comme un fluide de densité très faible, il n'oppose qu'une résistance insensible au mouvement des planètes, tandis que d'autre part il transmet, comme un solide, des vibrations transversales. M. Boussinesq tente d'expliquer ces contradictions par la lenteur relative du mouvement des corps célestes, permettant l'éther de conserver sa parité de constitution en tous sens et par suite les propriétés des fluides, tandis que la fluidité s'efface pour faire place à l'élasticité devant l'excessive vitesse des vibrations lumineuses. Quant à la densité de l'éther, elle ne peut être qu'extrêmement faible, et on doit le regarder comme *impondérable*, c'est-à-dire de *gravité* nulle. Ceci veut dire que les molécules d'éther sont simplement sensibles aux actions des molécules (de matière ou d'éther) extrêmement voisines, mais que le coefficient d'attraction newtonienne est nul pour elles. Au sujet de la constance de ce coefficient d'attraction pour tous les corps de notre système solaire et même stellaire, M. Boussinesq a émis une idée curieuse : ce serait une *sélection* inévitable, qui n'aurait maintenu dans le système et laissé participer à ses mouvements, à l'époque où il était une nébuleuse très diluée soustraite par sa raréfaction aux actions moléculaires, que des substances gravitant également (c'est-à-dire avec même coefficient d'attraction), à l'exception toutefois des matières de gravité nulle, comme l'éther, qui sont restées répandues dans tout l'espace. Dans d'autres systèmes stellaires, ceux des nébuleuses non résolubles dont

nous parlions plus haut, il se peut que le coefficient d'attraction soit différent.

Mais revenons à l'optique proprement dite. L'optique classique des radiations lumineuses a fait, depuis vingt ans, des progrès importants. Les procédés d'observation ont acquis une précision merveilleuse. Il est maintes fois arrivé à l'homme de génie de faire les plus fécondes découvertes avec les plus petits moyens ; on le verra sans doute encore, mais cependant dans les parties de la science déjà beaucoup élaborées, la perfection des procédés d'observation jouera désormais un rôle de plus en plus considérable. En spectroscopie, par exemple, l'âge héroïque de Kirchhoff et Bunsen est déjà loin; il faut avoir recours aux réseaux de diffraction et aux spectroscopes à échelons pour séparer les composantes très rapprochées d'une raie multiple. C'est ce qui fait qu'aujourd'hui la science coûte souvent très cher.

Une question extrêmement importante est celle de la structure des spectres. On est arrivé à résoudre des spectres de bandes lumineux en plus de quatre mille raies, constituant un ensemble de vibrations simples, simultanées et dues à une même cause. Il a été possible de démêler dans la disposition de cet ensemble des lois arithmétiques simples, et donner des formules dépendant des carrés de plusieurs entiers arbitraires. De telles recherches ont un intérêt de premier ordre; les théories sur la matière devront rendre compte de ces décompositions d'un type si différent de celui auquel nous ont

habitués d'autres phénomènes, comme les harmoniques d'un tuyau sonore ou d'une membrane vibrante. Les théories élastiques ne paraissent pas capables d'en donner l'explication; peut-être les théories électriques dont nous parlerons tout à l'heure seront-elles plus heureuses.

Une raie du spectre est caractérisée par sa longueur d'onde dans le vide. Existe-t-il des circonstances qui puissent modifier cette longueur d'onde et, par suite, la durée de la vibration? On obtient une modification apparente de la longueur d'onde dans ce que l'on appelle l'effet Döppler-Fizeau; il consiste dans un changement de longueur d'onde observé lorsque la distance de la source à l'observateur change rapidement. Dans le cas des ondes sonores, cet effet est facile à constater, le sifflet d'une locomotive nous paraissant rendre un son plus aigu quand on s'en approche, et plus grave quand on s'en éloigne. Dans le cas des ondes lumineuses, on a au spectroscope un déplacement de raie par rapport à une source fixe pour l'observateur; les observations faites en astronomie sur les spectres des astres ont permis d'utiliser le principe précédent. On a pu ainsi obtenir les composantes de la vitesse de certains astres dans la direction du rayon visuel; ainsi se trouve décelé le mouvement de l'astre suivant la troisième dimension de l'espace, qui avait jusqu'ici échappé à toute mesure. Il ne s'agit, d'ailleurs, dans tout ceci, que d'un changement apparent dans la longueur d'onde; en parlant plus loin de la belle découverte faite par M. Zee-

mann, nous aurons un exemple d'un changement réel.

L'éther transmet autre chose que la lumière. Au commencement du siècle dernier on découvrait les rayons calorifiques ultra-rouges et peu après les rayons ultra-violets capables d'agir sur certains composés chimiques. Chacune de ces radiations, dans le vide ou dans l'air, est caractérisée, comme nous l'avons dit, par sa longueur d'onde, c'est-à-dire l'espace parcouru par l'onde pendant la durée d'une période vibratoire. Ces longueurs sont extrêmement petites; pour les rayons visibles, elles varient de 0μ,734 pour le rouge extrême à 0μ,396 pour le violet extrême, en désignant par μ le micron ou millième de millimètre. Un phénomène capital est la dispersion : il consiste en ce qu'un rayon lumineux ou calorifique pénétrant dans un corps transparent est dévié. L'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde; ceci montre que, contrairement à ce qui se passe dans le vide, la vitesse de propagation dans le corps n'est pas la même pour toutes les vibrations. C'est là un point extrêmement important et qui tient à l'action de la matière pondérable sur l'éther, dont nous avons déjà dit un mot tout à l'heure. On a proposé, au sujet de cette action, diverses hypothèses donnant lieu à autant de théories de la dispersion, qui ont conduit à des relations entre l'indice de réfraction et la longueur d'onde prise soit dans le vide, soit dans le corps considéré, relations que l'expérience vérifie dans des intervalles plus ou moins larges. Les théories les plus satisfai-

santes sont celles d'Helmholtz et de M. Boussinesq; elles rendent notamment bien compte des phénomènes d'absorption et de dispersion anormales, un type de ceux-ci étant fourni par la vapeur d'iode, dont les propriétés absorbantes sont si remarquables et qui réfracte plus fortement le rouge que le violet (contrairement à ce qui a lieu pour le corps transparents) comme l'a montré autrefois M. Le Roux.

Le spectre infra-rouge a fait, dans ces vingt dernières années, l'objet de travaux nombreux. Pour pénétrer très avant dans l'étude de ces grandes longueurs d'onde, il faut recourir à l'observation de l'action calorifique. MM. Desains et Curie avaient déterminé la dispersion d'un prisme de sel gemme jusqu'à la longueur d'onde 7 μ et, en isolant, au moyen d'un diaphragme, une série de raies du spectre infra-rouge, mesuré la longueur d'onde de chacune d'elles avec un réseau et une pile thermo-électrique. M. Langley a poussé beaucoup plus loin ces recherches, en employant un instrument d'une merveilleuse sensibilité, le bolomètre; il a été possible d'aller ainsi jusqu'à des longueurs d'onde de 22 μ. La séparation des rayons calorifiques de grande longueur d'onde au moyen de la réflexion métallique a permis à M. Rubens d'aller plus loin encore, et la carte géographique de l'infra-rouge a pu être poussée jusqu'à des longueurs d'onde de 314 μ. Il semble que ce soit pour le moment la limite extrême des grandes longueurs d'onde auxquelles on soit parvenu en optique. Nous allons rencontrer bientôt en électricité des

longueurs d'onde considérables, mais les plus courtes d'entres elles, qui sont de 2.000 μ ne rejoindront pas encore les plus grandes radiations de l'infra-rouge. Les radiations ultra-violettes ont été étudiées avec le plus grand soin. L'ultra-violet solaire ne va guère au delà de 0 μ, 30, car notre atmosphère absorbe les rayons de moindre longueur d'onde, mais diverses sources terrestres, telles que l'arc électrique, ont permis d'aller plus loin. Il est nécessaire toutefois de se servir de pièces d'optique en quartz ou en spath fluor. Avec les lampes en quartz à vapeur de mercure on a pu aller jusqu'à 0 μ, 20. Schumann découvrit que le spath fluor absorbait moins que le quartz les rayons de petite longueur d'onde ; il a ainsi obtenu des rayons de longueur d'onde 0 μ, 103 : ce sont les rayons dits de Schumann.

Nous avons déjà parlé plusieurs fois, notamment à propos de l'aberration et de la dispersion, de l'action de la matière pondérable sur l'éther. Nous rencontrons encore l'action de l'éther (ou de la lumière) sur la matière pondérable dans les phénomènes, très délicats à observer, où se manifeste la pression exercée sur une surface par un faisceau de rayons lumineux. Cette force, dont Maxwell et Bartoli avaient théoriquement prédit l'existence, été mise en évidence par M. Lebedef; dans de telles expériences, il faut éliminer les effets provenant de l'échauffement, comme les forces provoquées par la convection des gaz, et aussi les forces de la nature de celles qui sont en jeu dans le radio-

mètre de Crookes. On comprend que la répulsion provenant de la radiation solaire doive jouer un rôle dans le mouvement des comètes et dans les apparences que présentent ces astres étranges; ainsi se trouve expliquée la force répulsive émanant du soleil, invoquée autrefois par M. Faye. Au point de vue *du principe de l'égalité de l'action et de la réaction*, cette action exercée sur les corps par la lumière soulève de graves difficultés, puisqu'il faut faire intervenir dans l'application du principe non seulement la matière, mais aussi l'éther.

Ne quittons pas l'optique classique sans dire un mot de l'instrument qui a transformé les sciences physiques et surtout les sciences biologiques, le microscope. En opérant dans les conditions les plus favorables, on arrivait jusque dans ces dernières années à obtenir pour deux points des images distinctes, quand leur distance n'était pas inférieure à environ un huitième de micron. Avec des dispositifs spéciaux, on peut aller plus loin aujourd'hui, car le problème est autre si, au lieu d'avoir un champ éclairé, on regarde sur un fond obscur des objets lumineux par eux-mêmes; c'est ce qui arrive déjà pour les étoiles regardées le jour ou la nuit même à l'œil nu. Il y a peu d'objets lumineux par eux-mêmes, mais on a l'équivalent en éclairant vivement l'objet de manière que le faisceau éclairant ne pénètre pas dans le microscope; on peut augmenter ainsi notablement la puissance du microscope et apercevoir des objets dits *ultramicroscopiques*, dont les diamètres sont environ vingt-cinq

fois plus petits que les objets *microscopiques* les plus petits, ce qui nous conduit aux cinq millièmes de micron.

Parmi les observations d'un intérêt philosophique général faites avec le microscope, d'ailleurs de moyenne puissance, il n'en est peut-être pas de plus importante que celle du mouvement *brownien*, récemment reprise par M. Gouy. Une goutte d'eau, par exemple, tenant en suspension quelque poussière minérale ou organique, est le siège de mouvements continuels. Chaque particule se meut autour de sa position moyenne : c'est une trépidation sans fin, comme l'a observé M. Gouy dans des préparations bien closes conservées pendant plusieurs années. Alors que nous voyons autour de nous tous les mouvements s'éteindre, quand on ne les entretient pas, par suite de résistances passives, le mouvement brownien est persistant, ou, du moins, semble persister très longtemps. Il paraît y avoir opposition avec la loi d'évolution qu'est le principe de Carnot. C'est ici qu'on voit la nécessité de regarder ce principe comme s'appliquant seulement à des ensembles suffisamment complexes; on ne doit pas l'appliquer à ces mouvements moléculaires cachés qui, d'après l'explication de M. Gouy, sont la cause des mouvements des particules en suspension dans le liquide. Il faut avouer que tout cela laisse un peu perplexe, et l'on se demande si, comme dans l'exemple précédent, des masses cachées devenant apparentes avec le microscope, ne risquent pas de mettre en péril les principes regardés comme les plus solidement établis.

Les questions relatives à la couleur des corps sont les plus délicates de l'optique. Un admirable modèle en ce genre nous est fourni par le mémoire de lord Rayleigh sur la lumière du ciel et sa couleur. Les molécules d'air agissent au regard des ondes lumineuses comme de petits résonnateurs, à condition que leurs dimensions soient très petites par rapport à la longueur d'onde. On trouve ainsi que les intensités de la lumière diffractée pàr les molécules d'air et la lumière incidente sont entre elles comme l'inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde. Cette loi permet de calculer la composition de la lumière transmise par l'atmosphère, et lord Rayleigh trouve une teinte voisine du bleu que nous connaissons.

II

L'OPTIQUE ET L'ÉLECTRICITÉ

La lumière et l'électricité sont restées longtemps deux domaines entièrement distincts. Le génie du grand physicien anglais Maxwell sut établir un rapprochement entre ces deux régions de la science. Maxwell repousse, comme Faraday, toute action à distance. Pour lui, tout corps électrique ou magnétique agit seulement sur les parties qui l'avoisinent immédiatement d'un milieu remplissant l'espace; ces actions se transmettent de proche en proche jusqu'à un autre corps. Dans cette théorie, les iso-

lants ou diélectiques jouent un rôle prépondérant; ils sont pénétrés par un fluide élastique hypothétique, analogue à l'éther, qui, en optique, transmet les radiations lumineuses. Maxwell est amené ainsi à étudier comment se propagent les perturbations provenant des variations périodiques d'un champ magnétique. En s'appuyant sur les lois connues de l'électricité et du magnétisme, et sur quelques hypothèses complémentaires, il trouve que les perturbations électromagnétiques doivent se propager avec une vitesse égale au rapport des unités absolues électrostatique et électromagnétique, et l'expérience lui montre que cette vitesse est celle de la lumière. Il est naturel alors de regarder comme identiques l'éther et le fluide que l'on suppose présider aux actions électromagnétiques, et d'envisager la lumière comme un phénomène électromagnétique : résultant des perturbations d'un champ magnétique : c'est la théorie électromagnétique de la lumière. Dans cet ordre d'idées, une onde lumineuse est produite par une suite de courants alternatifs qui se propagent par induction dans le vide ou dans les diélectriques et qui changent de sens un nombre immense de fois par seconde. Nous ne pouvons, d'ailleurs, nous faire aucune idée du procédé par lequel est entretenue, dans un corps lumineux, cette perturbation magnétique excessivement rapide.

Les vues géniales de Maxwell devaient conserver longtemps un caractère hypothétique; dans aucune expérience, on n'avait jamais mis en évidence la propagation d'une onde électromagnétique. C'est en

1888 que le physicien Hertz réalisa les expériences, à jamais mémorables, sur la propagation des ondes appelées aujourd'hui ondes hertziennes, en utilisant les décharges oscillantes d'un condensateur comme source de courants alternatifs à périodes extrêmement courtes. Depuis Hertz, de nombreux expérimentateurs ont apporté d'importants perfectionnements à ses méthodes. Il est d'un grand intérêt d'obtenir des longueurs d'onde les plus courtes possible dans une perturbation électromagnétique. On est arrivé à des longueurs d'onde de 2 millimètres, ce qui correspond à 150 milliards de vibrations par seconde. Nous sommes encore loin du nombre de vibrations correspondant aux rayons du spectre visible; il suffirait cependant de multiplier le nombre précédent par 13.000 pour obtenir un nombre de vibrations impressionnant la rétine et correspondant à la couleur orangée du spectre. En multipliant par 30, on rejoindrait à peu près les radiations que nous avons rencontrées tout à l'heure en parlant du spectre infra-rouge.

On a élargi le nouveau champ d'études, pour voir si l'analogie entre les deux ordres de phénomènes électrique et optique se poursuivait. Ainsi est née une sorte d'optique des oscillations électriques, dans laquelle on a cherché à imiter avec les radiations électriques les phénomènes depuis longtemps connus pour les radiations lumineuses, les uns et les autres ne différant, au point de vue de Maxwell et de Hertz, que par la longueur des périodes. On doit s'attendre à ce que, plus la longueur d'onde des

oscillations électriques sera petite, plus l'imitation sera satisfaite. Il en a bien été ainsi dans les nombreuses expériences faites depuis vingt-cinq ans; interférences, réfraction et réflexion, diffraction, double réfraction se retrouvent comme dans l'optique de la lumière. Dans les expériences électriques, les corps conducteurs et les électrolytes jouent, en général, le rôle des corps opaques en optique, et les corps isolants sont les analogues des corps transparents; ainsi, les métaux arrêtent comme un écran les ondulations électriques, au moins celles d'assez courtes périodes. Tous ces résultats paraissent confirmer l'identité entre les phénomènes lumineux et certains phénomènes électriques; ils sont d'une importance capitale pour la philosophie naturelle.

Nous avons donc, en résumé, pour la lumière, deux théories : une théorie élastique et une théorie électrique. Ces théories apparaissent comme bien différentes dans leurs points de départ; cependant, si, du moins, nous nous bornons à un milieu diélectrique et non magnétique, les équations différentielles traduisant analytiquement les phénomènes sont identiques. Les grandeurs qui y figurent n'ont évidemment pas la même signification. Dans la théorie élastique, tel vecteur représentera la vitesse d'une molécule d'éther, tandis que, dans l'autre théorie, il représentera la force électrique. Pour employer le langage dont nous nous sommes servi dans le chapitre précédent, nous pouvons dire que nous avons là deux *images* différentes, et cet exemple vient à l'appui de ce que nous avancions

sur la possibilité d'images diverses pour expliquer une même catégorie de phénomènes.

A un point de vue purement électrique, on doit remarquer que les manifestations mises en jeu par les perturbations hertziennes sont très spéciales. Ainsi, les courants continus se propagent le long d'un fil d'une tout autre manière que les perturbations de périodes extrêmement courtes; ce n'est que pour celles-ci que la vitesse de transmission est égale à la vitesse de la lumière, comme le montrent les belles expériences de M. Blondlot. On ne peut dire que tous les phénomènes électriques puissent être regardés comme résultant des mouvements de l'éther.

Une application des perturbations hertziennes appelle aujourd'hui vivement l'attention, je veux parler de la télégraphie sans fil. Son point de départ a été une découverte faite par M. Branly : un tube renfermant de fines limailles métalliques est rendu conducteur quand on vient à produire dans son voisinage une ou plusieurs décharges électriques, et la limaille reprend sa résistance primitive quand on donne au tube une petite secousse. De la conductibilité intermittente des radio-conducteurs de M. Branly, MM. Marconi et Popof ont tiré la télégraphie sans fil, remarquable exemple, après tant d'autres, d'une application pratique, conséquence de spéculations, comme celles de Maxwell, dont le caractère, au début, avait été uniquement théorique. On peut dire de la télégraphie sans fil qu'elle est une télégraphie optique; seulement, les ondes, au

lieu d'être extrêmement courtes, ont les longueurs relativement considérables signalées plus haut.

Nous avons parlé, plus haut, de l'effet Döppler-Fizeau, qui constitue un changement apparent dans la longueur d'onde d'une source lumineuse en mouvement. On s'est préoccupé depuis longtemps de trouver des circonstances qui modifient réellement la longueur d'onde d'une source de lumière. Faraday espérait les trouver en faisant agir le magnétisme; dans son expérience classique, la direction de la vibration est modifiée, mais non sa lumière, et il en est de même dans les recherches relatives à la réflexion sur des métaux aimantés. La variation de la pression dans certaines vapeurs amène un changement dans la longueur d'onde. Quant au magnétisme, il était réservé à M. Zeemann d'établir d'une façon irréfutable, l'existence de son action directe sur l'émission lumineuse.

Les belles expériences de M. Zeemann nous intéressent ici d'autant plus que leurs résultats essentiels avaient été prévus par une théorie qui tend aujourd'hui à prendre une place considérable en optique et en électricité, la théorie de M. Lorentz; j'en dois dire quelques mots pour avoir passé en revue les idées théoriques essentielles développées récemment en optique et en électricité. Dans la théorie de M. Lorentz, l'électricité adhère à la matière et les phénomènes électriques sont dus à certaines petites particules matérielles très ténues et chargées d'électricité, se déplaçant dans l'éther regardé comme immobile. Ces petits corps furent

appelés électrons; en électricité, les mouvements des électrons expliquent les courants électriques dans les conducteurs, résultat en accord avec les expériences de Rowland, qui a reconnu que le transport mécanique d'une charge électrostatique équivaut à un courant dirigé dans le sens du mouvement; dans les diélectriques, au contraire, les électrons ne peuvent s'écarter que peu de leurs positions d'équilibre. Pour la lumière, il existe dans chaque molécule rayonnante une ou plusieurs parties capables de vibrer autour d'une position moyenne; les électrons, ainsi vibrants, doivent donner lieu à des ondes électromagnétiques qui se propagent.

M. Lorentz a pu prévoir, dans le cas le plus simple, le phénomène observé ensuite par M. Zeemann, où le magnétisme agissant sur une source lumineuse monochromatique vient la modifier dans la durée de sa période et la polariser. D'après la théorie élémentaire, à la place d'une raie unique doivent apparaître, suivant la direction dans laquelle on observe, un doublet ou un triplet de raies. C'est ce qu'a montré l'expérience dans un grand nombre de cas; à la vérité, il y a parfois, comme l'ont trouvé MM. Cornu et Becquerel, un quadruplet, et les vues théoriques ont dû être un peu élargies, mais le phénomène de M. Zeemann n'en reste pas moins un mémorable exemple d'un fait d'une importance capitale annoncé d'abord par la théorie.

A un point de vue général, les idées de M. Lorentz appelleraient bien des réflexions. Au premier abord,

elles ont quelque chose d'un peu singulier par la manière dont elles matérialisent l'électricité : la théorie de M. Lorentz est beaucoup plus que celle de Maxwell et Hertz une tentative d'explication mécanique, au sens où on croyait autrefois entendre ce mot. Elle explique certains phénomènes optiques dont ne rend pas compte l'autre théorie. Mais, pour le moment, il y a lieu de les conserver toutes deux; suivant les phénomènes, il est plus simple de s'adresser à l'une ou à l'autre. Pendant longtemps encore, dans cette physique de l'éther, quand on tentera d'entrer dans le mécanisme des phénomènes, il sera utile d'avoir à sa disposition plusieurs systèmes de représentations. Nous reviendrons, d'ailleurs, plus loin sur cette notion, si importante dans la physique moderne, des électrons.

III

LES RAYONS CATHODIQUES ET LES RAYONS X

L'optique, prise dans son sens le plus large, ne s'est pas seulement augmentée récemment des rayons hertziens. D'autres rayonnements sont encore venus s'ajouter à ceux que nous connaissions déjà : leur étude a été singulièrement féconde et a conduit aux applications les plus curieuses et aux plus étranges conséquences théoriques. On savait, depuis les travaux de Crookes, que les décharges électriques passant dans l'atmosphère suffisamment

raréfiée d'une ampoule de verre, provoquent à la cathode une émission de rayons dits *cathodiques*, reconnaissables à la lumière qu'ils excitent en frappant diverses substances, déviables à l'approche d'un aimant et, par là, différant *a priori* de tous les rayons lumineux connus. Dans ces dix dernières années, les recherches sur les rayons cathodiques se sont multipliées; elles ont amené indirectement à la découverte des rayons Röntgen, puis à celle des rayons de Becquerel. Une première observation fut que les rayons cathodiques peuvent traverser des couches de matière suffisamment minces, telles qu'une mince feuille d'aluminium recouvrant une petite ouverture pratiquée dans la paroi de l'ampoule de Crookes, comme l'a remarqué M. Lénard. Les rayons continuent à se propager dans l'atmosphère extérieure, tout en étant fortement diffusés, et ils déchargent rapidement les conducteurs électrisés, propriété jusqu'alors inconnue. En outre, la propagation se fait dans un gaz d'autant plus loin que celui-ci est plus léger et plus raréfié.

Quelle est la nature des rayons cathodiques? Le fait que le milieu gazeux nécessaire au passage des décharges électriques et à l'excitation des rayons cathodiques est non seulement inutile, mais encore nuisible à la propagation de ces rayons, devait nécessairement amener une comparaison entre ces rayons et les rayons lumineux. Les physiciens allemands, à la suite de Hertz, regardèrent les rayons cathodiques comme un mode d'ondulation de l'éther lumineux. Mais, en face de cette théorie

d'*ondulation*, s'est dressée la théorie d'*émission* de l'école anglaise qui a définitivement prévalu. Crookes, étudiant jadis les actions mécanique et calorifique des rayons cathodiques, avait admis que ces actions sont dues à un bombardement formé de la matière du gaz raréfié sous un état spécial : c'est l'état radiant. La matière radiante était, pour Crookes, formée de particules animées d'une très grande vitesse et électrisées négativement.

La théorie d'émission a eu le mérite de faire prévoir notamment l'électrisation négative des rayons cathodiques d'après les valeurs observées des déviations magnétique et électrique de ces rayons cathodiques, propriété capitale démontrée nettement par M. Perrin ; elle permet de comprendre l'existence et le sens de la déviation magnétique des rayons cathodiques qui se comportent, en effet, dans ce phénomène comme le ferait un courant. Pour arriver à déterminer la vitesse des rayons, MM. Becquerel et J.-J. Thomson interprétèrent la déviation magnétique ou électrique de ces rayons en supposant que le flux d'électricité cathodique est formé de particules matérielles électrisées négativement. La théorie, développée suivant ce principe, permit de calculer la vitesse de propagation des rayons, et en même temps le rapport de la charge des particules à leur masse. Cette vitesse est d'autant plus grande que les rayons sont moins déviés par l'aimant et atteint dans les expériences actuelles jusqu'au tiers de la vitesse de la lumière. Mais cette grande vitesse de bombardement cathodique

anime seulement une masse qui, d'après les mêmes expériences interprétées par la même théorie, n'est que la deux millième partie environ de la masse d'hydrogène capable, dans l'électrolyse, de transporter la même quantité d'électricité que les rayons cathodiques. Un point important est que le rapport de la charge à la masse de la particule électrisée en mouvement est constant, c'est-à-dire indépendant de la nature du gaz, et il en est de même de la vitesse des particules pour un même potentiel de décharge. Il semblerait donc établi que les phénomènes cathodiques sont les mêmes dans tous les gaz, et, par suite, que les particules cathodiques sont constituées par une matière unique ayant, dans ces conditions, un équivalent électrochimique deux mille fois plus petit que l'hydrogène; nous verrons, dans un moment, quelles sont les idées les plus récentes à ce sujet. Ces conséquences et bien d'autres ont été découvertes grâce au mouvement d'idées produit par la théorie d'émission de l'école anglaise, généralement acceptée aujourd'hui, et qui a provoqué en France les importantes recherches de M. Perrin, de M. Villard, et de plusieurs autres physiciens. Ainsi, la théorie d'émission triomphe pour le moment, puisqu'elle se montre d'une très grande fécondité. Quant à la théorie ondulatoire, doit-elle être rejetée définitivement? Il serait imprudent de l'affirmer; pour qu'elle redevienne utile, faudrait imaginer quelque mode nouveau de perturbation de l'éther correspondant au transport des charges négatives, mais il semble que ce serait aller au-devant de bien grandes complications.

Des considérations indiquées ci-dessus, résulte que la masse d'une particule cathodique est très petite, environ la deux millième partie de la masse de l'atome d'hydrogène. M. J.-J. Thomson a été ainsi conduit à esquisser quelques vues générales sur la constitution de la matière dont je dois dire un mot. On a dans ce que les physiciens anglais ont longtemps appelé l'état radiant, un nouvel état de la matière. Tandis que, dans l'état ordinaire, les molécules ont des masses différentes avec la nature de la substance, les corpuscules de la matière radiante ont une masse invariable, de quelque substance qu'ils proviennent, cette masse étant la deux millième de celle d'un atome d'hydrogène; de plus, chacun de ces corpuscules porte une charge d'électricité négative qui est constante. Pour M. J.-J. Thomson, l'état corpusculaire fournit une représentation du fluide électrique dans la théorie d'un seul fluide. L'existence de la matière à l'état corpusculaire ne se manifeste pas seulement dans la production des rayons cathodiques ; M. Thomson trouve la matière cet état au voisinage d'une plaque métallique éclairée par la lumière ultra-violette. Il développe, de plus, toute une théorie qui n'est pas sans analogie avec celle de M. Lorentz, dont nous parlions plus haut, d'après laquelle la matière corpusculaire pénètre tous les corps métalliques; dans ceux-ci, comme dans les solutions, les charges électriques sont portées par des corpuscules.

Outre les rayons cathodiques, on distingue encore dans un tube de Crookes les rayons magnéto-catho-

diques, entrevus par Plucker, signalés ensuite par M. Broca, et étudiés, dans ces derniers temps, par M. Villard. Ces rayons se disposent suivant un tube de force magnétique ayant pour base la cathode; ils ne transportent pas d'électricité et sont déviés dans un champ électrique perpendiculairement à la force électrique. M. Villard a fait la très intéressante remarque que l'on constate ainsi pour la première fois une action du champ électrique perpendiculaire à sa direction, comme l'action du champ magnétique définie par la loi de Laplace. On pourrait supposer que les rayons magnéto-cathodiques transportent des particules magnétiques, comme les rayons cathodiques transportent des particules électriques, mais il convient d'attendre de nouvelles expériences, et la question reste obscure.

Après les rayons cathodiques, nous devons mentionner les rayons désignés sous le nom de rayons *X*. Leur découverte est due à M. Röntgen; l'illustre physicien montra, en 1895, qu'à l'extérieur d'une ampoule cathodique en activité se propage une nouvelle espèce de rayons capables, à la manière des rayons ultra-violets, de révéler leur présence en illuminant le platinocyanure de baryum et diverses substances dans lesquelles ils excitent une phosphorescence visible, capables aussi d'impressionner les plaques photographiques même après avoir traversé des corps opaques pour tous les rayons lumineux connus. De plus, il se propagent très exactement en ligne droite, sans se réfracter ni se diffracter; du moins on les considère encore ainsi le plus souvent,

quoique certains faits paraissent conduire d'autres conclusions. Ils sont absorbés par les divers corps, suivant la nature des éléments chimiques qui les constituent, les éléments de plus faibles poids atomiques étant, en général, les moins absorbants; par là, ils se rapprochent des rayons cathodiques, mais ils sont bien plus pénétrants que ceux-ci. Les rayons de Röntgen se différencient surtout des rayons cathodiques en ce qu'ils ne sont point déviés par les champs magnétiques ou électriques et qu'ils ne transportent point de charges électriques.

Les physiciens discutent encore sur la nature des rayons *X*. Röntgen semblait, au début, disposé à voir des vibrations longitudinales de l'éther dans les phénomènes qu'il avait découverts. On a pensé ensuite que l'émission de ces rayons serait due à un effet d'induction électromagnétique développée dans l'éther du vide par l'arrêt brusque des projectiles cathodiques au moment où ils rencontrent une paroi du tube de Crookes; les rayons *X* pourraient alors être comparés à des rayons lumineux de longueurs d'onde extrêmement petites, et ce seraient des rayons ultra-ultra-violets, ce qui est d'accord avec le fait que leur vitesse de propagation paraît identique à celle de la lumière. On comprend ainsi qu'ils ne se diffractent pas sensiblement; on voit moins bien pourquoi ils ne se réfractent pas à moins d'admettre, avec M. Boussinesq, qu'il n'y a plus de réfraction quand les longueurs d'ondulation ne sont plus qu'une petite fraction des dimensions de la molécule, comme s'annule sensiblement sur une mer agitée

l'impulsion d'ensemble que subit, de la part des vagues, un très grand navire assez étendu pour en recouvrir toujours plusieurs.

Tout cela est loin cependant d'être très clair. La théorie des brusques permutations électromagnétiques se propageant avec la vitesse de la lumière a reçu récemment une sorte de confirmation par les expériences très remarquables de M. Lane sur la transmission des rayons *X* à travers les cristaux ; le passage des rayons *X* à travers ceux-ci paraît donner lieu à des phénomènes d'interférence et de diffraction, qui mettent en évidence la structure régulière du milieu cristallin.

On a adopté pendant quelque temps une explication proposée par Stokes. Les chocs des projectiles cathodiques ne produisent pas une succession continue d'ondes analogues à celles que produisent la lumière, mais des ondes *solitaires* comme il s'en rencontre en hydraulique, quand on lève brusquement une vanne. Il n'y a donc pas, dit-on, dans les rayons *X* la périodicité qui est, en optique, l'origine des phénomènes de réfraction et de polarisation ; mais ceci est très contestable, les ondes solitaires pouvant se produire périodiquement.

Un chapitre intéressant a été ajouté à l'étude des rayons *X* par M. Sagnac : c'est celui des rayons secondaires. Tous les corps se comportent comme des milieux troubles pour les rayons *X*. Cette dissémination, au moins dans les corps de gros poids atomiques, comme le plomb, est accompagnée d'une transformation des rayons en rayons *secondaires*,

plus absorbables que les rayons générateurs. L'émission secondaire est par là comparable, dans une certaine mesure, à la transformation d'une lumière qui frappe un corps fluorescent en une lumière de couleur différente, mais elle se présente comme une propriété surtout atomique. De plus, ces rayons secondaires semblent formés eux-mêmes par un mélange de rayons non déviés et de rayons analogues aux rayons cathodiques ; en fait, ils sont électrisés négativement.

Outre les propriétés de rendre certains corps fluorescents et d'impressionner les plaques photographiques, les rayons *X* possèdent la propriété de décharger les conducteurs électrisés, même quand les rayons traversent seulement les gaz soumis aux champs électriques des conducteurs sans effleurer ceux-ci. Quand les rayons *X* frappent un conducteur électrisé, à l'action de décharge due à la conductibilité du gaz s'ajoute une action supplémentaire variant avec le métal, et qui provient des rayons secondaires issus du métal.

Rappelons enfin que, la propagation rectiligne des rayons *X* à travers les corps a permis d'observer l'intérieur des corps opaques à la lumière par le simple examen des silhouettes de ces corps projetées par un tube à rayons *X* sur un écran phosphorescent (radioscopie) ou sur une plaque photographique qu'on peut, après développement, observer à loisir (radiographie). Cette méthode d'exploration, due à M. Röntgen, appliquée à l'intérieur du corps humain, a rendu de grands services à la médecine et à la

chirurgie; elle a rendu populaires les rayons X. Un point très important est que le pouvoir absorbant de ces rayons est indépendant de l'état physique du corps considéré ou de la combinaison chimique dont il fait partie : c'est une propriété atomique.

Il est essentiel de signaler encore les rayons cathodiques à charge positive que l'on appelle *Kanalstrahlen*. Ces rayons passent à travers de petits trous percés dans une cathode; on a pu les dévier par un champ électrique ou magnétique, et le sens de la déviation correspond à un transport de charges positives, mais la grandeur de ces déviations est beaucoup moindre que pour les rayons cathodiques proprement dits.

IV

LES NOUVEAUX RAYONNEMENTS ET LA MÉCANIQUE DES ÉLECTRONS

Les rayons hertziens, les rayons cathodiques et les rayons X ne sont pas les seules conquêtes faites, depuis vingt ans, dans l'étude des rayonnements. M. Gustave Le Bon appela l'attention sur diverses expériences curieuses quoique d'interprétation assez obscure, dont il a repris la description dans un volume appartenant à cette collection, en exposant ses idées sur la généralité des dissociations atomiques. M. Henri Becquerel, peu de temps après la découverte de M. Röntgen, reconnut que l'uranium et les sels d'uranium émettent des rayons

invisibles impressionnant la plaque photographique et rendant l'air qu'ils traversent conducteur de l'électricité ; il fut établi qu'ils traversent le papier noir, les métaux, qui ne se réfléchissent ni ne se réfractent. Enfin, ce qui est le plus surprenant, c'est que l'*émission des rayons est spontanée;* elle n'est produite par aucune cause excitatrice connue ; elle se conserve, en dépit des combinaisons chimiques, et l'origine de l'énergie mise en jeu fut l'objet de longues discussions. D'autres corps jouissent des mêmes propriétés que l'uranium. La *radio-activité*, mesurée par la vitesse de décharge d'un condensateur électrique, est beaucoup plus grande dans certains minerais naturels d'uranium et de thorium que dans l'uranium lui même et les minerais correspondants préparés artificiellement. Mme Curie en a conclu que les minerais naturels, d'activité anormale, renferment des traces de substances nouvelles très fortement radio-actives. Cette remarque fut le point de départ de recherches mémorables entreprises par M. et Mme Curie, avec la callaboration de M. Bémond, qui conduisirent à admettre l'existence de deux nouvelles substances, l'une, le *polonium*, précipité dans les combinaisons chimiques avec le bismuth, l'autre, le *radium*, précipité avec le bayrum.

La découverte du radium a été confirmée par l'analyse spectrale, et on a pu fixer approximativement le poids atomique de ce nouveau corps qui forme le dernier terme de la série des métaux alcalino-terreux. La remarquable méthode de recherches inaugurée par M. et Mme Curie a permis à

M. Debierne de découvrir un autre élément, l'*actinium*, analogue au thorium, dont il est difficile à séparer, et permettra, sans doute, de découvrir encore d'autres éléments jumeaux d'éléments déjà connus. Une grande difficulté de ces recherches est qu'un élément inactif par lui-même peut devenir actif lorsqu'il est exposé, pendant un temps suffisant, aux rayons du radium ou de substances analogues; ce phénomène de radio-activité induite est d'ailleurs temporaire.

L'étude des radiations analogues à celles de l'uranium, et que l'on désigne aujourd'hui sous le nom de *rayons de Becquerel*, a fait l'objet d'un nombre immense de travaux en France, en Allemagne et en Angleterre. Il en résulte que ces rayonnements sont formés de rayons de trois espèces. Ceux de la première espèce qu'on appelle les rayons γ sont analogues aux rayons X, et ont été découverts par M. Villard. Ceux de la deuxième, les rayons β, sont analogues aux rayons cathodiques; ils sont déviés par l'aimant et sont chargés d'électricité négative, de telle sorte que les corps radio-actifs dégagent spontanément, et d'une façon continue, de l'électricité; la vitesse du bombardement cathodique des rayons β est énorme et peut, dans certains cas, se rapprocher de la vitesse de la lumière. Enfin une troisième espèce de rayons, les rayons α, sont déviés dans un champ magnétique en sens inverse des rayons cathodiques et par suite chargés d'électricité positive; ils ont une vitesse moindre que les rayons β.

Rappelons encore un des chapitres les plus mystérieux des nouveaux rayonnements, celui de l'émanation qui se dégage des corps radio-actifs et communique temporairement aux autres corps des propriétés radio-actives; cette émanation est d'ailleurs liée à la présence de la matière et se transmet par les gaz. De plus, les solutions des sels de radium dégagent d'une manière continue un mélange d'hydrogène et d'oxygène contenant de l'*hélium*, d'après MM. Ramsay et Soddy; cet hélium est regardé comme résultant de la désagrégation de l'atome de radium. Enfin, les sels de radium sont spontanément lumineux : le chlorure de radium sec émet une lumière assez intense pour qu'on puisse lire dans l'obscurité.

Au point de vue purement théorique, l'intérêt des nouvelles substances est très grand; il réside dans les propriétés extraordinaires du rayonnement spontané de ces substances. Les discussions soulevées à ce sujet touchent aux bases mêmes de la science, au principe de la conservation de l'énergie, au principe de Carnot, à l'invariabilité de l'atome, à la nature de la matière. A la vérité, ces difficultés ont à peu près disparu, car au moins en considérant la partie des nouveaux rayonnements assimilables aux rayons cathodiques, il n'est pas douteux qu'il y ait une émission de matière. D'ailleurs, cette émission est assez faible pour le radium, puisque la transformation d'un gramme de radium demanderait 1.750 ans. Il n'y a, dans ces conditions, aucune contradiction avec le principe de la conservation de l'énergie, mais alors il faut admettre que l'atome

chimique n'est pas un édifice immuable et se désagrège en *sous-atomes* radiants. On peut expliquer par cette dislocation les dégagements de chaleur observés par Curie et aussi le fait qu'un sel de radium enfermé dans un tube scellé, prend une charge d'électricité positive, les rayons négatifs β sortant du tube et les rayons α étant arrêtés. Quant au principe de Carnot, on ne sait vraiment pas à quoi s'adresser, pour l'appliquer, au milieu de ces dislocations atomiques, et le mieux est de n'en pas parler à cette occasion. On voit que la découverte des rayons de Becquerel et de Curie n'intéresse pas moins la chimie que la physique, et que les diverses radiations, dont nous venons d'esquisser l'histoire, pourraient modifier nos idées sur plus d'un point fondamental; elle a donné aussi une vive impulsion à une théorie dont nous allons parler dans un moment, celle des électrons.

Pour ce qui concerne les applications, les corps radiants sont des auxiliaires utiles dans les laboratoires de physique. Leur propriété de rendre l'air conducteur de l'électricité est déjà fréquemment utilisée; on peut aussi faire des radiographies en utilisant ces corps. En chimie, les études à faire sont nombreuses : le radium provoque des actions chimiques énergiques, comme la transformation du phosphore blanc en phosphore rouge. Enfin, des applications industrielles sont à prévoir. On pourrait, par exemple, utiliser un jour, pour l'éclairage, une substance aussi spontanément lumineuse que le radium; une révolution se prépare peut-être ainsi

dans les moyens d'éclairage. On mesure le progrès qui se trouverait réalisé quand on pense qu'aujourd'hui nous ne savons mettre en mouvement l'éther, pour produire des vibrations lumineuses, qu'en chauffant des corps matériels, ce qui ne donne, en énergie utilement rayonnée, qu'un rendement très faible. Toutefois, la production de lumière sans chaleur jusqu'ici réalisée seulement, semble-t-il, par certains insectes, ne serait pas réalisée par le radium, comme on avait pu l'espérer un moment, puisqu'un gramme de radium émet, par heure, cent trente-deux calories. La rareté et le prix élevé du radium rendent d'ailleurs très difficiles actuellement les applications, en dehors de celles qui touchent à la médecine.

On parle beaucoup, depuis quelque temps, des *électrons* et de la Mécanique à laquelle conduit leur théorie. Il n'est pas facile en quelques lignes de faire comprendre en quoi consiste cette Mécanique nouvelle, où il est question de masse dépendant de la vitesse et où on discute si cette masse est tout entière d'origine électromagnétique. Reprenons la particule électrique du tube de Crookes et regardons-la comme se mouvant dans l'éther immobile. On sait que dans celui-ci les composantes de la force électrique et de la force magnétique en chaque point satisfont aux six équations de Hertz, et l'énergie électromagnétique pour une variation du champ est posée égale à la variation d'une certaine intégrale triple étendue à tout l'espace, intégrale où figure la somme des carrés des six composantes des

champs électrique et magnétique. Rappelons-nous aussi que, conformément à l'expérience célèbre de Rowland, un corps électrisé en mouvement crée un champ magnétique, de telle sorte que le mouvement de la particule va modifier l'état de l'éther; ces variations pourront être étudiées en se servant des équations de Hertz. Si le mouvement de la particule est uniforme, les variations se réduisent à un transport de même direction et à un sillage électromagnétique accompagnant le point. Il n'y a pas alors de variation dans l'énergie telle qu'elle a été définie plus haut; mais la création du sillage exige une certaine quantité d'énergie, différence entre l'énergie électromagnétique totale du sillage et l'énergie électrostatique de la particule au repos. Or, dans le cas d'une particule sphérique, le calcul donne pour cette quantité d'énergie une formule simple où figurent la charge électrique e, le rayon de la sphère et le rapport de la vitesse v de la particule à la vitesse V de la lumière. Si ce rapport est petit, la formule peut être réduite à son premier terme qui est de la forme mv^2. On a alors une énergie cinétique de même forme que dans la Mécanique classique; le coefficient m, que l'on peut appeler la masse électromagnétique, s'exprime à l'aide de la charge e, du rayon de la sphère et de la vitesse de la lumière V. Quand le rapport $\frac{v}{V}$ n'est pas très petit, on peut toujours mettre l'énergie sous la forme mv^2, mais alors m dépend de la vitesse v, et la formule montre que m grandit indéfiniment à mesure que v se rap-

proche de V. Il semble que nous soyons bien loin des substances radio-actives avec ces considérations, où les équations différentielles de Hertz jouent un rôle peut-être trop grand pour plus d'un lecteur. Nous avons dit plus haut qu'au moyen des déviations des rayons cathodiques dans un champ électrique et dans un champ magnétique, on avait pu mesurer la vitesse v de la particule et le rapport $\frac{e}{m}$ de sa charge à sa masse. D'ailleurs, dans ce calcul, on s'appuie sur les formules ordinaires de la Mécanique, les forces provenant des lois classiques de l'électricité et du magnétisme. Les substances radio-actives, comme le radium, permettent de refaire avec les rayons β les mêmes expériences dans des conditions plus larges, notamment avec des vitesses v beaucoup plus grandes. Comme la charge e est invariable dans toutes les expériences, ou du moins est regardée non sans raison comme telle, on a pu comparer les variations des valeurs de m résultant des expériences précédentes avec celles que donne la formule théorique dont j'ai parlé tout à l'heure; la concordance est satisfaisante, et c'est ainsi qu'on a conclu que l'inertie de la particule est tout entière d'origine électromagnétique. Il est permis de garder peut-être quelque doute à l'endroit de ce résultat, les expériences étant loin d'avoir, surtout quand v se rapproche de V, la précision que l'on exige en physique sur des points qui touchent aux principes fondamentaux de la science. Admettons-le toutefois avec d'éminents physiciens. Ce que nous avons appelé

jusqu'ici du mot un peu vague de particule, a donc une masse tout entière d'origine électromagnétique : c'est un atome d'électricité, un *électron;* il s'agit ici d'électron *négatif.*

On fait en définitive retour à une ancienne hypothèse, en admettant qu'il existe des fluides électriques. L'atome d'électricité ou électron a une valeur absolue $1{,}13 \times 10^{-19}$ coulomb égale à la charge transportée par un atome d'hydrogène dans l'électrolyse. L'inertie des corpuscules s'explique par un phénomène de self-induction, un électron en mouvement étant équivalent à un courant, conformément à une expérience célèbre de Rowland. Il n'y a maintenant qu'un pas à faire pour proclamer que la matière est uniquement composée d'électrons, et il a été franchi par les physiciens qui aiment à chercher dans des idées hardies un stimulant à leurs recherches.

Nous n'avons parlé que d'électrons *négatifs;* l'idée d'électrons *positifs* de même nature que les électrons *négatifs* ne semble guère admise aujourd'hui. Ce n'est pas qu'il n'y ait des rayonnements positifs actuellement connus; tels sont les rayons α du radium et les rayons canaux dont nous avons parlé plus haut. Quelques physiciens considèrent cependant comme très probable l'existence d'électrons positifs et cette interprétation a été utile à M. Jean Becquerel dans ses expériences sur les spectres d'absorption aux basses températures.

Je suis loin d'ailleurs d'avoir effleuré toutes les questions qui se posent dans cette nouvelle Méca-

nique. J'ai parlé simplement de la masse ; il faudrait distinguer une masse longitudinale et une masse transversale, mais celle-ci intervient seule jusqu'ici dans les conditions expérimentales habituelles. Ne nous troublons pas trop d'ailleurs de ce que la masse varierait avec la vitesse ; jusqu'à cent mille kilomètres par seconde, cette variation serait négligeable, et ce n'est pas là une vitesse courante dans la Mécanique appliquée.

Quoi qu'il en soit, une théorie de la matière, sinon entièrement nouvelle, du moins orientée d'une manière plus précise, a été édifiée en prenant pour base la considération des électrons. On y conçoit la matière comme constituée d'électrons positifs et d'électrons négatifs ; elle devient ainsi de l'électricité en mouvement.

V

LE PRINCIPE DE RELATIVITÉ

On parle beaucoup aujourd'hui du principe de relativité en électro-optique. Dans la théorie de Lorentz, nous avons un éther immobile, mais aucune expérience optique faite à la surface de la terre ne permet de mettre en évidence le mouvement de translation de celle-ci.

Du moins telle est la forme générale que l'on donne aujourd'hui en électro-optique à ce que l'on appelle le principe de relativité. On généralise ainsi les résultats de deux ou trois expériences négatives.

dont une de Michelson, à laquelle nous avons fait allusion plus haut. Si on se reporte alors aux équations générales de Lorentz en électricité, on est conduit à d'étranges conséquences pour pouvoir expliquer le principe de relativité. Qu'un système soit en repos ou en mouvement de translation uniforme, les équations de Lorentz doivent conserver la même forme; on en conclut que ces équations restent invariables quand on effectue sur les coordonnées x, y et z, et le temps t un certain groupe de transformations (groupe de Lorentz). En langage ordinaire, ceci veut dire que dimensions et temps changent avec le mouvement du système. Un même objet mesuré par deux observateurs qui se meuvent uniformément l'un par rapport à l'autre, n'a pas la même longueur; c'est la célèbre « contraction de Lorentz ». Des conséquences analogues existent pour l'intervalle de temps entre deux événements : simultanés par exemple pour certains observateurs, les mêmes événements cessent de l'être pour d'autres observateurs en mouvement par rapport aux premiers.

Ainsi les vieilles notions de sens commun sur l'espace et le temps seraient à reviser. A d'autres époques, on aurait eu plus de confiance dans la *sagesse des nations*, et, plutôt que de bousculer les notions communes sur l'espace et le temps, on aurait abandonné l'éther immobile et les équations de Lorentz. Certains physiciens d'ailleurs ne participent pas à la frénésie révolutionnaire qui caractérise aujourd'hui de nombreux savants. Rien sans doute n'est intangible dans la science; certaines notions

de sens commun ont dû à la longue être modifiées, et quand des expériences *positives* auront montré la nécessité de changer nos idées traditionnelles sur l'espace et le temps, il n'y aura qu'à s'incliner. Mais il ne semble pas que ces changements s'imposent encore. Que d'hypothèses se dissimulent dans l'établissement des équations, regardées, elles, comme intangibles, de l'électromagnétisme, et on pourrait faire encore d'innombrables hypothèses sur la constitution de l'éther, peut-être même le supprimer.

Mais, du reste, entre les mains d'Einstein, le principe de relativité est en train d'évoluer; la vitesse de la lumière ne serait plus un invariant absolu, car il y avait cependant un *absolu* au milieu de tout ce relativisme. Mais il s'agit de choses plus étonnantes encore, comme *la pesanteur de l'énergie*. Peut-être, dans cet ordre d'idées, y aurait-il des constatations expérimentales possibles, et alors les choses deviendraient très intéressantes. Ainsi, un rayon de lumière venant d'une étoile serait attiré par le Soleil, et il y aurait une différence entre la masse de gaz tonnant et la masse de l'eau, qu'il peut former, prise à la même température.

Souhaitons qu'il sorte quelque chose de précis de ces spéculations hardies. Le lecteur désireux d'entendre deux sons de cloche entièrement différents sur ces sujets pourra consulter un article de M. Brillouin, « Propos sceptiques au sujet du principe de relativité », dans la revue italienne *Scientia* (1913), et une longue note de M. Langevin dans le *Journal de Physique théorique et appliquée* (1913).

CHAPITRE V

La Physique de la matière et la Chimie.

I. Physique moléculaire et Chimie physique. — II. L'Énergétique et la Chimie. — III. Chimie organique et Chimie minérale.

I

PHYSIQUE MOLÉCULAIRE ET CHIMIE PHYSIQUE

Les recherches d'optique et d'électricité, dont nous venons de parler, offrent un exemple de la première tendance précédemment signalée, où le physicien cherche une explication mécanique des phénomènes qu'il étudie. Dans les remarques que nous avons présentées plus haut, on a vu que toute une partie de la science de notre époque s'oriente dans une autre direction; comprenant dans un autre sens le mot explication, on se propose seulement de rechercher des relations numériques générales entre les grandeurs dont, au moins pour le moment, on ne discute pas la nature.

Nous avons déjà parlé de l'énergétique, et nous aurons à revenir bientôt sur ses applications à la chimie et à la physico-chimie, dont beaucoup rentrent dans la seconde tendance. Mais en fait, il est rare que celle-ci puisse se développer dans toute sa pureté ; chemin faisant, les hypothèses cinétiques, atomiques ou autres s'introduisent presque nécessairement et sont fécondes pour la découverte.

Arrêtons-nous d'abord sur cette partie de la physique de la matière et de la chimie physique où les hypothèses cinétiques et atomiques ont permis d'édifier de vastes théories. Des travaux importants relatifs à la physique moléculaire ont suggéré des vues générales. On a considéré pendant longtemps les états d'agrégation principaux de la matière comme des états bien distincts ; les états solide, liquide, gazeux étaient regardés comme possédant des propriétés caractéristiques, qui ne laissaient aucune incertitude sur leur distinction en trois états. Depuis les premières recherches de Faraday sur la liquéfaction des gaz, les relations entre l'état gazeux et l'état liquide ont été mises en lumière par de nombreuses recherches. La découverte du point critique pour un gaz a été capitale. Des études théoriques et expérimentales ont été consacrées à la recherche de la relation devant, pour chaque gaz, être substituée à la loi de Mariotte, entre le volume spécifique, la pression et la température ; les travaux théoriques de M. van der Wals sur ce sujet resteront célèbres, ainsi que sa loi des états correspondants, d'après laquelle cette relation est la

même pour tous les corps, quand on rapporte la pression, le volume et la température à leurs valeurs au point critique. A la vérité, les expériences de M. Amagat et de M. Mathias ont montré que la loi précédente n'avait pas toute la généralité d'abord admise, mais elle conserve toute sa valeur, quand on range les corps en différents groupes, et elle reste ainsi un fécond instrument de classement. Les recherches sur la statique des fluides à basse température et sur la continuité de la matière à l'état liquide et à l'état gazeux ont joué un rôle important dans la question de la liquéfaction des gaz. Il suffira de rappeler que, depuis 1878. M. Cailletet et ensuite MM. Pictet, Wrobleski, Olzewski, liquéfièrent l'air, l'azote, l'oxygène. En 1898, la machine de M. Linde a fait de la liquéfaction de l'air à 190 degrés au-dessous de zéro une opération industrielle, et M. Claude a récemment construit des machines fondées sur un principe un peu différent, en ce sens qu'il effectue la détente de l'air avec travail extérieur, tandis que le physicien allemand effectue la détente sans travail extérieur. L'hydrogène a été liquéfié, il y a quelques années, par M. Dewar. Le dernier des gaz permanents, l'hélium qui, depuis plusieurs années, avait résisté à toutes les tentatives de liquéfaction, vient enfin de céder aux efforts de M. Onnes. Son point d'ébullition, déterminé avec un thermomètre à hélium, est égal à 4°5 absolus ; sa température critique n'est pas beaucoup au-dessus de 5°, et la pression critique peu supérieure à 2,3 atmosphères.

Des expériences nombreuses ont été faites sur les déformations permanentes des solides ; entre autres conclusions, la déformation permanente d'un solide paraît constituée par des glissements qui se produisent, d'après le commandant Hartmann, dans des plans faisant avec la direction de la traction un angle fixe. Les solides possèdent des propriétés longtemps regardées comme caractéristiques de l'état liquide : ils s'écoulent et ils peuvent se diffuser les uns dans les autres de manière à donner des solutions solides. Ces analogies, dont on pourrait allonger la liste, entre les liquides et les solides conduisent à penser que, de même qu'il y a continuité entre l'état liquide et l'état gazeux, il doit y avoir une continuité analogue entre l'état solide et l'état liquide. La question est très délicate. Certains corps, comme le verre, sont susceptibles de fusion pâteuse, et il y a alors un passage continu de l'état solide à l'état liquide. D'autre part, quand un corps est cristallisé, on peut *a priori* affirmer qu'il n'est pas possible de passer, d'une manière continue, de l'état solide à l'état liquide sans éviter la discontinuité de la fusion ; car, si étrange que cela paraisse, on connaît aujourd'hui des liquides biréfringents, c'est-à-dire cristallisés. Il semble cependant, d'après les vues développées par M. Le Chatelier et les expériences de M. Tamman, que le passage continu n'est pas possible de l'état solide à l'état liquide quand un seul de ces états est cristallin, l'autre étant amorphe. Il y aurait donc une différence très grande entre les passages de l'état solide à l'état

liquide, et de l'état liquide à l'état gazeux. De tels problèmes sont d'un intérêt considérable, touchant à l'essence même de la matière et les physiciens cristallographes s'engagent aujourd'hui avec ardeur dans ces recherches.

Dans la physique moléculaire, la théorie cinétique de la matière a donné lieu à de grands développements. Après avoir eu, avec Clausius et Maxwell, une grande vogue, elle a paru quelque temps frappée de discrédit. On ne voit pas actuellement ce qui pourrait remplacer les hypothèses cinétiques et rendre compte, pour prendre un exemple, d'un phénomène comme la diffusion. Pour les gaz, la théorie cinétique explique divers faits importants, elle a même conduit à prévoir que le frottement intérieur est indépendant de la pression. En s'appuyant sur diverses expériences, on a pu obtenir la vitesse moyenne des molécules à une température donnée : ainsi les molécules d'hydrogène ont, à zéro degré, une vitesse moyenne de 1.840 mètres ; les molécules d'oxygène ou d'azote ont une vitesse plus petite de l'ordre du demi-kilomètre par seconde. Les théories cinétiques de la matière reprennent faveur aujourd'hui ; elles n'ont pas été moins fécondes dans l'étude des liquides que dans celle des gaz. Il ne sera pas sans intérêt d'indiquer quelques exemples relatifs à la théorie des gaz. On a pu calculer le libre parcours moyen d'une molécule, qui est la valeur moyenne du chemin qu'une molécule parcourt en ligne droite entre deux chocs successifs. Ce libre

parcours moyen est lié à la viscosité du gaz, Maxwell ayant montré que la viscosité est à peu près égale au tiers du produit de la densité du gaz, de la vitesse moyenne de la molécule, et du libre parcours moyen. Celui-ci, à une température donnée et pour un même gaz, varie en raison inverse de la pression. Pour l'oxygène et l'azote, à la température ordinaire et sous la pression atmosphérique, la valeur du libre parcours est environ un dix-millième de millimètre; elle est double pour l'hydrogène et l'hélium. Aux basses pressions réalisées dans le tube de Crookes, une molécule peut parcourir en ligne droite plusieurs centimètres sans rencontrer une autre molécule.

On connaît la loi d'Avogadro, d'après laquelle, à l'état gazeux, des nombres égaux de molécules différentes, enfermées dans le même volume à la même température, y développent la même pression. Dans une molécule-gramme d'un gaz, c'est-à-dire dans la masse qui pèse en grammes le poids moléculaire, ou bien encore qui occupe dans les conditions normales un volume de 22, 32 litres, se trouve un nombre N de molécules, toujours le même, quel que soit le gaz. On donne à la constante universelle N le nom de *nombre d'Avogadro*. On a cherché par différentes voies à obtenir N; on peut y parvenir soit à l'aide de la viscosité des gaz, soit en étudiant le mouvement brownien, comme l'a fait récemment M. Perrin dans une admirable série d'expériences, soit en faisant des mesures sur le bleu du ciel, sans parler des méthodes où inter-

viennent la radioactivité ou le spectre du corps noir. Il est extrêmement remarquable que des chemins si divers mènent sensiblement au même nombre, soit $N = 70.10^{22}$. Ce nombre étant connu, on peut déterminer le poids des molécules. Ainsi la molécule O^2 d'oxygène pèse $\frac{32}{N}$, soit 52.10^{-24} gramme.

On a pu aussi déterminer le libre parcours moyen d'une molécule, c'est-à-dire la valeur moyenne du chemin qu'une molécule parcourt, en ligne droite, entre deux chocs successifs. Ainsi pour l'oxygène (dans les conditions normales) ce libre parcours est sensiblement un dix-millième de millimètre, il est le double pour l'hydrogène. Du libre parcours, on peut déduire, connaissant la vitesse moyenne, le nombre des chocs par seconde; pour les molécules de l'air dans les conditions normales, ce nombre est de cinq milliards. Tous ces nombres, obtenus par des procédés divers, incitent fortement à croire à la réalité moléculaire.

La distinction entre la physique et la chimie a été longtemps absolue; les questions traitées n'avaient rien de commun et les points de vue y étaient entièrement différents. Peu à peu les sphères de contact ont apparu. La loi de Dulong et Petit sur les chaleurs spécifiques, d'après laquelle les atomes de tous les corps simples ont la même capacité calorifique; la loi de Faraday, énonçant que l'action chimique d'un courant électrique est la même sur la molécule d'un sel quelconque, peuvent être citées, entre bien d'autres, comme les conclusions

d'études à la fois physiques et chimiques. Depuis vingt ans, on parle couramment de chimie physique, et une science, en quelque sorte nouvelle, s'est constituée : toutes les grandes universités possèdent aujourd'hui des chaires de chimie physique. Celle-ci n'a pas tardé à voir se développer dans son sein des points de vue assez différents. Les uns la regardent particulièrement comme une application à la chimie des lois générales de l'énergétique, en réduisant au minimum les hypothèses explicatives ; d'autres, au contraire, plus aventureux, n'ont pas craint d'édifier, en outre, des théories audacieuses, dont la discussion quelquefois passionnée donne actuellement à cette partie des sciences physiques une vie extrêmement intense.

Une partie importante de la chimie physique est dominée par les hypothèses moléculaires et atomiques, qui sont à la base de la chimie moderne. L'étude de l'abaissement du point de congélation des dissolutions a conduit Raoult aux lois célèbres qui portent son nom, et les mesures *cryoscopiques* sont maintenant usuelles en chimie. Chacun sait qu'un liquide contenant en dissolution des matières étrangères se congèle à une température plus basse que quand il est pur : l'étude des phénomènes de ce genre constitue la cryoscopie. Un résultat fondamental est que, pour un même liquide, l'abaissement du point de congélation ne dépend que du nombre, et nullement de la nature des molécules dissoutes. Il y a, toutefois, des exceptions à cette loi ; si elle est exacte pour les dissolutions des corps

organiques dans l'eau, elle cesse de l'être pour les sels minéraux. D'une manière générale, elle ne s'applique pas aux solutions électrolytiques, c'est-à-dire qui laissent passer l'électricité; mais, pour les physico-chimistes, l'exception, suivant le vieil adage, a confirmé la règle. Il y a, suivant eux, pour les molécules dissoutes une dissociation plus ou moins complète et, en particulier, pour les solutions très étendues, la loi reparaît dans toute sa simplicité à condition de donner au mot de molécule un sens convenable; nous reviendrons bientôt sur cette idée en parlant de l'hypothèse des *ions* qui joue un rôle si important dans la chimie physique. Le nom de Raoult restera aussi attaché à la *tonométrie*, c'est-à-dire l'étude des vapeurs émises par les solutions. La présence d'une matière dissoute élève le point d'ébullition de la solution et diminue la tension de vapeur du dissolvant. Ici encore le nombre seul des molécules, et non leur nature, intervient. Le dissolvant restant le même en quantité et qualité, la diminution de la tension de vapeur est proportionnelle au nombre des molécules dissoutes : telle est la loi des concentrations moléculaires de Raoult.

Toutes ces études sont liées étroitement à la question de la pression osmotique dans les dissolutions. L'attention avait été appelée jadis, par Dutrochet, sur l'importance des phénomènes d'osmose dans la vie végétale, mais c'est par les travaux de M. Pfeffer que ces notions, d'abord un peu vagues, se précisèrent, cela surtout grâce à l'artifice de la membrane

semi-perméable donnant libre passage à l'eau et arrêtant les corps en dissolution. La pression osmotique est, en quelque sorte, la part de pression dans la dissolution due aux molécules dissoutes ; il est facile de la définir, avec précision, d'une manière purement expérimentale. La loi fondamentale de l'osmose est que, sauf certaines exceptions, toute molécule, quelle que soit sa nature, exerce en dissolution la même pression osmotique ; celle-ci est donc proportionnelle au nombre des molécules réparties dans un volume donné. Nous retrouvons les mêmes propriétés moléculaires, et des études plus complètes, tant théoriques qu'expérimentales, ont montré les liens étroits entre les phénomènes osmotiques, la cryoscopie et la tonométrie. Dans ces recherches, les principes fondamentaux de l'énergétique sont constamment appliqués ; reconnaissons que, avec les raisonnements actuellement employés, il est nécessaire de faire usage de certains postulats plus ou moins avoués, en particulier l'existence de parois semi-perméables laissant passer tels corps, mais imperméables pour tel autre. Mais la jeune école de physico-chimie a la foi qui transporte les montagnes, et bien des découvertes ont justifié ses audaces. L'assimilation faite par M. van t' Hoff entre la pression osmotique dans les solutions et la pression dans les gaz, qui le conduisit à étendre aux solutions l'équation caractéristique des gaz, a été très féconde. Merveilleuses aussi sont, dans leur simplicité, ces formes de démonstrations où intervient le principe de Carnot, comme pour le

gaz, et, avec lesquelles, par exemple, on établit, *a priori* la nécessité de l'abaissement de la tension de vapeur émanée d'une solution. Quoi qu'il puisse advenir de certaines interprétations, des faits d'une importance capitale ont été mis en évidence. Ils intéressent la chimie comme la physique, car la théorie des pressions osmotiques revient, en somme, au problème des équilibres chimiques; ils intéressent aussi les sciences de la vie, car l'osmose intervient dans les rapports de la cellule vivante avec le milieu ambiant. Depuis vingt ans, le rôle biologique de la force osmotique a été mis en évidence; il faut citer au moins à ce sujet les belles recherches de M. de Vries, en physiologie botanique, sur la turgescence des cellules et les coefficients d'isotonie.

Nous avons vu que, dans certains cas, les lois de Raoult cessent d'être exactes, et il en est de même pour celles qui concernent les pressions osmotiques. Ainsi, pour la majorité des sels dissous dans l'eau, les pressions sont plus fortes qu'il ne faudrait : elles ne correspondent pas au nombre des molécules qui paraissent exister dans la solution, mais à un nombre plus grand. Ainsi une solution très étendue de sel marin se comporte, par rapport à la loi de Raoult, comme si elle renfermait un nombre de molécules de chlorure de sodium double de celui qu'elle contient. M. Arrhenius émit l'idée hardie qu'il y avait là un phénomène de dissociation, et qu'en général dans les solutions de sels, d'acides ou de bases dans l'eau, il y a des molécules dissociées

en grand nombre, celui-ci étant d'autant plus grand que la solution est plus étendue : c'est la dissociation électrolytique, et on donne le nom de *ions* aux éléments électrolytiques. De plus, en vue d'expliquer l'action des courants sur les solutions, on suppose que les *ions* portent une charge électrique; ainsi les *ions* chlore et les *ions* sodium dans une dissolution de sel marin sont chargés respectivement d'électricité négative et d'électricité positive. Ces vues, au premier abord étranges, sont loin d'être admises par tous les chimistes, quelques-uns étant gênés de voir que l'ion positif hydrogène et l'ion négatif chlore possèdent des propriétés si différentes de celles que nous connaissons à l'hydrogène et au chlore. Diverses expériences semblent cependant bien montrer la réalité d'un double mouvement matériel pendant le passage d'un courant dans une solution, et il ne semble pas qu'aucun fait précis leur ait été opposé. Les nouvelles hypothèses ont réussi, au contraire, à grouper autour d'elles un grand nombre de faits épars; combinées avec les lois de la thermodynamique, elles ont été l'origine d'une théorie importante qui a fait prévoir des faits nouveaux, éclairé le mécanisme de nombreuses réactions chimiques et fourni même une représentation de la manière dont se produisent les forces électromotrices qui faisait l'objet de discussions depuis l'époque de Galvani et Volta. Il importe peu, d'ailleurs, qu'une théorie choque ou non nos habitudes; c'est un point sur lequel il est inutile d'insister après ce que nous avons dit sur la façon dont

on doit envisager les théories physiques. En pressant un peu la théorie des *ions*, on a été conduit à penser que les charges de tous les *ions* sont des multiples de la charge portée par l'*ion* d'hydrogène; nous savons, comme il a été dit dans le chapitre précédent, que les physiciens vont aujourd'hui beaucoup plus loin dans la dissection de la matière. Remarquons-le encore une fois : il est singulier de voir reparaître partout des théories d'émission, alors que les théories ondulatoires semblaient assurées d'un triomphe définitif. *Habent sua fata theoriæ!* Je dois ajouter toutefois qu'il est des chimistes n'aimant guère ces vues hypothétiques, et que, par exemple, pour plusieurs d'entre eux, certains faits visés plus haut pourraient être expliqués, en niant la dissociation électrolytique et en admettant, au contraire, la polymérisation de la molécule d'eau; mais, quoi qu'il en soit de l'avenir des théories électrolytiques, on ne peut nier qu'elles aient provoqué un mouvement expérimental considérable, ce qui est le point essentiel. La physiologie et la médecine se sont emparées aussi de la conception nouvelle et en ont tiré un heureux profit; nous aurons l'occasion d'y revenir.

II

L'ÉNERGÉTIQUE ET LA CHIMIE

Nous venons de jeter un coup d'œil sur une direction des recherches de chimie physique, où inter-

viennent de nombreuses hypothèses ayant pour objet de faire pénétrer dans le mécanisme intime des phénomènes. Une autre partie essentielle de la chimie physique consiste dans les applications de l'énergétique à la chimie, en ne s'appuyant sur aucune hypothèse explicative, mais seulement, quand il est nécessaire, sur les lois expérimentales relatives à chaque catégorie de phénomènes. Elle s'est surtout développée sous l'influence des travaux de W. Gibbs, aux États-Unis, et de Helmholtz, en Allemagne. Sa caractéristique est de mettre en évidence l'aptitude de chaque système à entrer en action, ce que Sadi Carnot appelait la puissance motrice, Helmholtz l'énergie libre, et ce que M. Duhem appelle le potentiel thermodynamique : cette fonction, en particulier, joue dans l'étude des équilibres chimiques le même rôle que le potentiel en mécanique rationnelle.

Les travaux de Helmholtz *sur la Thermodynamique des phénomènes chimiques*, quoique moins importants que ceux de Gibbs et un peu postérieurs, ont eu, au début, plus de retentissement. Les mémoires du savant américain sont restés pendant quinze ans à peu près inconnus, jusqu'au jour où M. van der Waals en a fait comprendre l'importance aux chimistes hollandais. Depuis lors, les idées de Gibbs se sont rapidement répandues en Hollande à la suite des travaux de M. Baknuis Rozeboom et de ses élèves; en Allemagne, de MM. Ostwald et Nernst; aux États-Unis, de MM. Trevor et Bancroft; en France, de MM. Duhem et Le Châtelier. Si la plupart

des chimistes, adonnés à la chimie physique, s'inspirent aujourd'hui directement des idées de Gibbs, il s'est cependant produit, dans l'intervalle écoulé entre leur première publication et leur diffusion, un certain nombre de recherches indépendantes, comme celles de M. van t' Hoff et de M. Le Châtelier, dont les résultats considérés alors comme nouveaux ont contribué aux progrès de la science. On a reconnu, depuis, que les plus importants d'entre eux étaient contenus implicitement dans l'œuvre du savant américain.

L'introduction de l'énergétique en chimie a rendu deux ordres de services également importants. Elle établit d'abord entre certaines grandeurs mesurables des relations nécessaires que l'expérimentation abandonnée à elle-même serait sans doute bien longue à reconnaître; elle donne, en second lieu, des procédés rationnels de classification pour les faits observés. Le premier de ces services se comprend aisément. Le second est peut-être plus important encore : il permet d'augmenter considérablement, si je puis dire, le rendement scientifique de l'expérimentation, en faisant ressortir des analogies qui auraient pu longtemps échapper.

Parmi les découvertes de Gibbs, une des plus importantes est la célèbre *loi des phases*. Cette loi groupe tous les phénomènes d'équilibre chimique avec une clarté que l'on croyait impossible à atteindre; elle a permis de se reconnaître dans l'étude expérimentale de systèmes très complexes que l'on n'aurait jamais songé autrefois à aborder.

Parmi les recherches importantes qu'elle a facilitées, on peut citer l'étude des équilibres complexes entre les différents sels de l'eau de mer, et les études sur les alliages métalliques, questions dont l'intérêt industriel égale l'importance scientifique. Cette loi établit des relations nécessaires entre le nombre des phases, c'est-à-dire des différentes masses homogènes existant dans un système en équilibre chimique et celui des composants indépendants intervenant dans la réaction d'équilibre envisagée. On obtient cette loi, sans qu'il soit besoin d'aucun calcul, en rapprochant le nombre des paramètres nécessaires pour définir l'état d'un système de corps du nombre des relations qu'établit entre ces paramètres la condition d'équilibre. Dans un système en équilibre, le nombre r des phases ne peut dépasser de plus de *deux* unités le nombre n des constituants du système. Quant $r = n + 2$, l'équilibre ne peut exister qu'à une seule pression et à une seule température; le système est dit alors invariant, tel est le cas d'un système renfermant de l'eau sous chacun des trois états de glace, de liquide et de vapeur. Un système est monovariant, si $r = n + 1$: pour l'équilibre, on peut alors se donner arbitrairement soit la température, soit la pression; ainsi, pour une température donnée, il y a une tension de transformation, et le type le plus simple d'un système monovariant est fourni par un liquide surmonté de sa vapeur. Cette classification se poursuit, et tous les systèmes chimiques qui appartiennent à une même catégorie présentent de

nombreuses analogies. La connaissance des cas simples, où les constituants sont peu nombreux, permet d'aborder l'étude des cas complexes similaires.

Les équilibres chimiques, dont nous avons la connaissance expérimentale, sont des équilibres stables, c'est-à-dire que si on écarte un tel système de son état d'équilibre par l'intervention d'une action extérieure, il tend à revenir à son état initial, une fois l'action extérieure supprimée. Cette stabilité de l'équilibre entraîne, en chimie comme en mécanique, certaines relations entre les grandeurs caractéristiques du système. Ces relations présentent une importance capitale; elles permettent de prévoir le sens du déplacement de l'équilibre sous l'influence d'un changement de pression, de température, etc. Cette loi, partiellement énoncée par M. van t' Hoff, sous le nom d'équilibre mobile de température, a été présentée sous sa forme générale par M. Le Châtelier, sous le nom de principe d'opposition de l'action à la réaction : elle avait été établie antérieurement, dans toute sa généralité, par Gibbs. Une des conséquences de cette loi est que tout changement de température tend à déplacer l'équilibre dans un sens tel que la chaleur mise en jeu dans la réaction provoque une variation inverse de la température : ainsi, une élévation de température provoque une réaction avec absorption de chaleur. Il en est de même pour ce qui concerne la pression, la force électromotrice, la masse des corps en réactions. Cette loi si générale, qui avait échappé

aux expérimentateurs, leur est aujourd'hui d'un grand secours. Elle coordonne toutes les anomalies que semblait présenter la variation de la stabilité avec la température. Il en résulte, en particulier, que les sels qui se dissolvent avec dégagement de chaleur présentent une solubilité décroissante à mesure que la température s'élève; la même loi nous apprend aussi que les composés chimiques formés avec dégagement de chaleur sont d'autant plus stables que la température est plus basse, tandis que les composés endothermiques, comme l'acétylène, sont d'autant plus stables que la température est plus élevée. »

Indépendamment de ces lois tout à fait générales, l'application de l'énergétique à la chimie a permis d'établir un certain nombre de lois plus restreintes en ce sens qu'elles s'appliquent à des points singuliers des phénomènes d'équilibre. Telles sont les lois relatives à l'influence de l'état des corps sur leur solubilité, particulièrement étudiées par M. Le Châtelier, qui a démontré la nécessité de la multiplicité des courbes de solubilité et a basé sur ce fait la théorie de la prise du plâtre et des mortiers hydrauliques. Citons encore le théorème de Gibbs sur les maxima des courbes de solubilité, qui a rendu de grands services dans l'étude expérimentale des alliages et l'étude des points anguleux des courbes de solubilité dont la théorie fait connaître d'importantes propriétés.

Toutes les lois que nous venons de rappeler sont absolument rigoureuses, elles donnent des relations

numériques entre les changements corrélatifs de pression et de température dans les systèmes en équilibre chimique, des relations qualitatives au sujet du changement des masses. Il existe un second groupe de relations semblables qui n'ont plus la même rigueur, car elles s'appuient sur des lois expérimentales limites et visent parfois des corps fictifs comme les gaz parfaits dont les analogies avec les corps réels sont plus ou moins lointaines. Ces nouvelles relations, au point de vue théorique, doivent donc être classées bien loin derrière les premières; mais, au point de vue pratique du chimiste expérimentateur, leur intérêt est encore très grand. La plus importe de telles lois se rapporte à l'équilibre des systèmes gazeux, et donne une relation entre les observations simultanées de masse que l'on peut faire subir aux constituants d'un système gazeux en équilibre sans altérer cet état d'équilibre; elle a été établie pour la première fois par Gibbs en partant d'une hypothèse sur le potentiel des mélanges gazeux choisie de façon à satisfaire à certaines expériences de Regnault. Cette loi est aujourd'hui le guide de tous les expérimentateurs qui s'occupent de l'équilibre des systèmes gazeux homogènes; elle présente, au point de vue industriel, un intérêt capital en ce qui concerne les phénomènes de combustion du charbon et les phénomènes de réduction des minerais. Dans un ordre de recherches analogues rentrent les études de M. van t' Hoff sur l'équilibre des mélanges liquides homogènes; en faisant une hypothèse sur les pres-

sions osmotiques pratiquement équivalente à la loi de Wüllner, l'illustre chimiste est arrivé à une formule générale de l'équilibre des solutions diluées offrant une grande analogie avec celle des mélanges gazeux.

Ces exemples montrent l'importance énorme que prend l'application à la chimie des lois générales de l'énergétique. De ces applications, les unes ont un caractère tout à fait rigoureux, ou du moins offrant la même certitude que les lois fondamentales de la science de l'énergie; d'autres s'appuient sur des lois expérimentales plus ou moins approchées. Les premières, ici comme en physique, sont, en quelque sorte, qualitatives; dans les secondes, les formules rigoureuses ne sont pas suffisantes parce qu'elles renferment, outre les volumes, les pressions, des températures, les phases, les quantités de chaleur, toutes grandeurs accessibles à l'expérience, les potentiels qui échappent à nos mesures. Il faut éliminer ces potentiels pour arriver à des formules quantitatives utilisables par l'expérimentation. On ne le peut que dans certains cas particuliers, et, en général, l'élimination est impossible si l'on s'en tient aux principes généraux, et c'est alors que doivent intervenir certaines lois expérimentales.

L'idée féconde de l'équilibre chimique, qui joue un si grand rôle dans la science de notre époque, avait déjà, il y a longtemps, attiré l'attention de Berthollet. Plus tard, le travail de M. Berthelot sur l'éthérification, et les admirables recherches d'Henri

Sainte-Claire Deville et de ses disciples sur la dissociation ont réellement créé la chimie physique, en mettant en pleine lumière la notion de l'équilibre chimique. Il ne faut toutefois pas oublier qu'il est des équilibres d'une autre nature, ne correspondant pas à des transformations réversibles ; ce sont les cas de repos chimique, comme les appelle M. Le Châtelier, ou de faux équilibres, comme on les désigne souvent avec M. Duhem. Ainsi, à la température ordinaire, l'oxygène et l'hydrogène ne se combinent pas : c'est là un faux équilibre. Le faux équilibre est comparable à l'équilibre d'un corps rugueux retenu par le frottement sur un plan incliné ; il y a en chimie, au moins dans certaines conditions, des résistances passives jouant un rôle analogue au frottement et à la viscosité. Aussi longtemps qu'on a confondu les équilibres véritables et les faux équilibres, la confusion en mécanique chimique est restée inextricable ; la distinction commence aujourd'hui à devenir familière. Les actions de présence et les nombreux procédés mis en œuvre pour réaliser les réactions ont pour effet d'annuler les résistances passives, de même que l'huile annule le frottement dans les machines. L'étude théorique des faux équilibres présente des difficultés considérables. On sait à combien de discussions donnent lieu, en mécanique rationnelle, les recherches faites depuis Coulomb sur le frottement, et il est clair que le problème de mécanique chimique est beaucoup plus général.

M. Duhem, dont les ouvrages et les travaux per-

telle représentation, il faut, en dehors de la connaissance des analyses et des diverses réactions que le corps possède, avoir une idée exacte du nombre d'atomes contenus dans sa molécule, et, par conséquent, il faut connaître son poids moléculaire. Il n'y a pas bien longtemps encore, on ne possédait qu'une seule méthode pour déterminer les poids moléculaires : elle découlait de la loi d'Avogadro et d'Ampère, et elle était basée sur la détermination des densités de vapeur. Elle n'était donc applicable qu'aux corps capables de se volatiliser sans altération et était forcément d'un emploi restreint. Un autre procédé fut indiqué par M. Berthelot, basé sur la transformation du corps étudié en carbure saturé correspondant, carbure dont on pouvait déterminer ensuite le poids moléculaire par la méthode des densités de vapeur. D'autres méthodes sont aujourd'hui couramment employées; parmi elles, on doit surtout citer celles de Raoult, se déduisant de ses recherches sur la cryoscopie et la tonométrie, et basées, l'une sur le retard de la congélation d'un liquide tenant en dissolution un poids connu d'un corps solide ou liquide, l'autre sur la détermination de la diminution de la tension de vapeur d'un liquide tenant également en dissolution un poids connu du corps dont on veut connaître le poids moléculaire A côté de ces méthodes générales, il y a certaines méthodes employées dans des cas spéciaux, comme celles qui résultent des études de la vitesse du son dans les gaz ou vapeurs considérés, et de la variation du pouvoir osmotique.

Pendant de longues années, la chimie organique s'est contentée de représenter par une formule plane la constitution des corps. Il n'était sans doute dans la pensée de personne que cela représentait la forme de l'édifice isolé, mais c'était une première approximation montrant le nombre des atomes de carbone existant dans une chaîne, avec la façon dont ils étaient reliés les uns aux autres, et la manière dont les diverses fonctions se rattachaient aux atomes de carbone. Dans ces quinze dernières années, les chimistes organiques ont eu une prétention plus haute : ils ont voulu représenter le corps, dont ils avaient établi la constitution, par une formule qui montrât la situation des divers atomes dans l'espace, et la *stéréochimie* s'est développée. Celle-ci a pour point de départ les travaux cristallographiques de Pasteur, et a eu pour créateurs M. Lebel et M. van T. Hoff.

Pasteur, en étudiant les acides tartriques, avait trouvé que tout corps actif sur la lumière polarisée possède une structure dissymétrique, et il avait conclu que, si le corps est actif en solution, c'est à la dissymétrie de la molécule qu'il le doit. A l'époque où Pasteur fit ses travaux, on ne savait pas établir les formules de constitution des corps, c'est-à-dire la façon dont les différents atomes sont unis dans la molécule, et on ne pouvait avoir qu'un résultat en quelque sorte global. MM. Le Bel et van t' Hoff, presque simultanément et sous des formes différentes, énoncèrent ce fait qu'il suffisait qu'un corps contînt un carbone asymétrique pour qu'il pût pos-

séder le pouvoir rotatoire, un carbone asymétrique correspondant dans la formule de constitution à un atome de carbone uni à quatre restes différents. Les deux chimistes passèrent en revue tous les corps répondant à cette donnée, et ils trouvèrent que tous, au moyen de procédés spéciaux, pouvaient acquérir une action sur la lumière polarisée. Ainsi, Pasteur annonce qu'une molécule qui agit sur la lumière polarisée est un édifice dissymétrique; MM. Le Bel et van t' Hoff précisent en montrant qu'il suffit qu'une molécule possède un atome de carbone asymétrique. Il résulte de là que les corps ne peuvent être représentés que par une figure dans l'espace, et de là est née la stéréochimie. Utilisée d'abord par les inventeurs, pour l'étude des corps ayant comme support de la dissymétrie le carbone, la méthode stéréochimique a été étendue par M. Le Bel à l'azote pentavalent, et elle a tout récemment été appliquée avec succès aux dérivés dissymétriques de l'étain et du soufre quadrivalents; la forme de l'édifice moléculaire dans l'espace a même fait découvrir une nouvelle isométrie stéréochimique indépendante du pouvoir rotatoire et qui a été mise en lumière par les travaux de M. von Bæyer. Sans doute, les théories stéréochimiques ne laissent pas de prêter à quelques critiques, et la partie mécanique en est plus que rudimentaire. M. Le Bel insiste, d'ailleurs, avec raison sur l'hypothèse de la fixité relative des divers éléments de la molécule. Sans elle, il n'y a plus de de stéréochimie : c'est ce qui semble arriver quand, par suite de diverses circonstances, comme l'éléva-

tion de température, la molécule vient à manquer de stabilité.

Les travaux de synthèse chimique sont d'une importance capitale, tant pour la théorie que pour la pratique. La synthèse de l'urée, faite par Wöhler à partir du cyanate d'ammoniaque, avait été suivie des célèbres procédés de synthèse à partir des éléments imaginés par M. Berthelot. Ils avaient créé une méthode nouvelle consistant à partir du simple pour aller au composé ; c'est dans cette voie, à la suite de M. Berthelot, que le monde chimique s'est engagé aujourd'hui. Mais il est indispensable, pour y marcher, d'avoir des guides : ces guides sont représentés par les théories, et, à ce point de vue, la stéréochimie s'est montrée très féconde. Les importants travaux de M. E. Fischer, qui n'ont pu être faits que grâce aux conceptions stéréochimiques, en donnent un remarquable exemple. Déjà l'on savait que l'aldéhyde méthylique se condensait sous l'influence des substances alcalines pour donner naissance à des corps répondant à la formule du glucose, mais on n'avait pu isoler du mélange des espèces chimiques pures. M. Fischer, qui venait de découvrir la phénylhydrazine, l'appliqua à extraire du mélange des corps définis et il réussit à obtenir des corps cristallisés, des osazones. Il put ensuite, au moyen de ceux-ci, revenir par des chemins différents au sucre qui leur avait donné naissance et préparer ainsi synthétiquement la lévulose. Se basant sur les vues théoriques données par la stéréochimie, il a agrandi considérablement le cadre des sucres avec six atomes

de carbone, et cette magnifique étude est, en chimie, l'une des plus remarquables de ces derniers temps.

Nous devons encore mentionner les tentatives heureuses faites pour reproduire un certain nombre de corps que nous offre la nature, parce qu'elles se rattachent aux vues théoriques de la situation des atomes dans l'espace. Les travaux sur le groupe des uréides ont conduit à la préparation artificielle de la caféine et de la théobromine, alcaloïdes du café et du cacao. Dans ce même groupe des alcaloïdes, on a établi la constitution de l'atropine et de la cocaïne, et on a réalisé une synthèse partielle de cette dernière ; on a fait aussi la synthèse du principe odorant de l'essence de violettes, qu'on a désigné sous le nom d'ionone, et celle du principe odorant de l'iris. On peut dire que toutes les synthèses chimiques sont abordables aujourd'hui. Elles seront d'autant plus vite réalisées que les chimistes travaillant dans cette voie auront à leur disposition les capitaux et les moyens dont dispose l'industrie ; nous avons là un remarquable exemple d'une alliance entre l'industrie et des théories subtiles spéculant sur l'architecture des molécules.

A côté des vues et des idées théoriques qui guident le chercheur, les nouveaux réactifs contribuent grandement au progrès des sciences expérimentales. Ce ne serait point ici le lieu d'entrer dans des détails à cet égard. Cependant, parmi les réactifs nouveaux utilisés en chimie organique, il en est un d'un caractère général, et sur lequel nous aurons à revenir en

biologie, je veux parler des ferments solubles retirés des plantes ou des animaux. On avait bien utilisé précédemment les microbes pour la préparation de certains composés chimiques, comme les acides lactique et butyrique, mais on n'entrevoyait pas de quelle façon ils opéraient. Les travaux de Büchner sur la levure de bière ont montré que ces microorganismes sécrètent une matière de nature albuminoïde, une zymase, qui, indépendamment de tout phénomène vital, est capable de dédoubler le sucre en alcool et en acide carbonique. La production de l'alcool est donc due à un phénomène chimique provoqué par une substance spéciale sécrétée par la levure et c'est là un résultat d'un intérêt considérable. Des ferments du même ordre, mais provoquant des oxydations ou des hydratations, ont été découverts, dans le suc de certaines plantes, par M. G. Bertrand et par M. Bourquelot. Il est vraisemblable que c'est aussi à des corps analogues qu'on doit attribuer les phénomènes d'oxydation produits par la bactérie du sorbose, si bien étudiés par M. G. Bertrand. La mise en œuvre de ces ferments a déjà permis d'obtenir à l'état de pureté certains corps qu'on n'avait pu préparer jusqu'ici, et il est vraisemblable qne leur emploi se généralisera.

Nous avons déjà assez souvent parlé des rapprochements entre les diverses branches de la science pour ne pas être étonné de la contribution apportée par la chimie organique à la chimie minérale. Indiquons, à ce sujet, quelques exemples. M. Fischer avait isolé une classe de dérivés organiques qu'i

avait désignés sous le nom d'*hydrazines*; le point de départ de cette série est un hydrure d'azote, l'hydrazine, Az^2H^4, dont la synthèse a été faite par des voies organiques avant de l'être par des procédés minéraux. M. Curtius a, de même, déduit des composés diazoïques, l'azimide, Az^3H, qui a ensuite été obtenu au moyen d'une réaction minérale très simple. La chimie organique a dû ses progrès si rapides à la prévision des réactions, grâce aux formules de constitution. Leur introduction en chimie minérale, quoique moins aisée à cause de la difficulté qu'on éprouve souvent à connaître la vraie condensation moléculaire, a été un grand avantage et a permis d'obtenir un grand nombre de composés nouveaux. Il n'est pas douteux que divers corps de la chimie minérale présentent des molécules complexes où certains groupements paraissent dissimulés, comme on l'observe dans les dérivés du chrome et du fer; ces faits sont comparables à ceux qu'on observe en chimie organique, et M. Colson en a fait une étude approfondie. Citons encore, à ce sujet, l'étain capable d'éprouver une modification profonde qui le rend absolument méconnaissable, modification se produisant lentement au-dessous de vingt degrés et conduisant à ce que l'on appelle l'*étain gris*, de moindre densité que l'étain blanc.

La notion de valence a été aussi en chimie minérale un guide fécond, né en grande partie des notions acquises en chimie organique et de l'extension, grâce à Raoult, des méthodes permettant de mesurer les poids moléculaires. La classification périodique de

M. Mendeleef qui, malgré ses défauts, garde toujours une grande valeur, classe les corps d'après leur valence maxima, par rapprt à l'oxygène. Ces valences maxima ne sont fréquemment pas utilisées dans leur totalité, et on a pu ainsi fort bien expliquer ces innombrables combinaisons, qu'on nommait autrefois d'addition, telles que les sels doubles. Leur nombre s'est beaucoup accru dans ces dernières années, à mesure qu'on établissait mieux leur constitution. Tels sont, par exemple, les chlorhydrates de chlorure et les sels tétracuivriques de M. Sabatier; tel est encore le tétrachlorure de plomb dû la notion de la tétravalence du plomb, établie par la chimie organique. On sait aussi quelle importance a eue la classification de M. Mendeleef pour la découverte de nouveaux corps, comme le germanium et le scandium.

Parmi les causes directrices des travaux les plus importants faits en chimie, on doit encore compter les perfectionnements des mesures physiques et les moyens d'action puissants que les progrès de la physique ont mis à la disposition des chimistes. C'est la précision des mesures de densité qui a conduit lord Rayleigh à soupçonner dans l'azote atmosphérique un gaz plus lourd, non contenu dans l'azote, de l'azotite d'ammoniaque, et qui, plus inerte que l'azote, a pu être séparé par l'action du magnésium au rouge : la découverte de ce nouveau corps dans l'air, l'*argon*, due à la collaboration de lord Rayleigh et de M. Ramsay, a eu un grand retentissement.

En ce qui concerne les nouveaux moyens d'investigation, la production des basses températures a devant elle un grand avenir. Grâce à la découverte du point critique et à l'application de la détente, le problème général de la liquéfaction des gaz a été résolu dans toute son étendue.

La distillation fractionnée de l'argon a fourni à M. Ramsay toute une série de gaz satellites, le crypton, le néon, le métargon, le xénon. Outre ces gaz, l'air atmosphérique renferme encore de *l'hélium*, ce gaz dont l'analyse spectrale avait d'abord révélé l'existence dans le Soleil et que M. Ramsay avait découvert dans un minerai rare, la clévéite.

Les gaz rares ont été retrouvés par M. Moureu dans toutes les sources thermales; celles-ci contiennent de l'hélium, du néon, de l'argon, du krypton, du xénon et des émanations radioactives, dont elles amènent sans cesse au jour des quantités fort différentes. Il est vraiment curieux de constater que l'hélium est resté longtemps pour nous un corps hypothétique connu seulement par ses raies dans le Soleil, alors que telle source minérale, comme la source Carnot à Santenay, débite par an 17.845 litres d'hélium. C'est un fait important, résultant des recherches de M. Moureu, que dans toutes les sources les valeurs du rapport krypton-argon sont voisines de celle du même rapport dans l'air, tandis que l'hélium varie beaucoup par rapport aux gaz rares du type de l'argon. C'est sans doute que l'hélium provient de la transformation des matières radio-actives, tandis que les autres gaz complète-

ment inertes n'ont pas varié depuis les premiers âges de la Terre. Il paraît d'autre part vraisemblable que la teneur de l'air en hélium augmente avec l'altitude, et même que l'hélium doit quitter la Terre pour se répandre dans les espaces célestes. Peut-être qu'à l'altitude de 100 ou 150 kilomètres ne reste-t-il plus dans l'atmosphère que de l'hydrogène et de l'hélium.

D'après ce que nous en connaissons, la physique et la chimie des basses températures conduiront certainement à des résultats de la plus haute importance. C'est un fait bien curieux que l'accroissement indéfini de la conductibilité électrique des métaux, à mesure que la température décroît. Aux températures extrêmement basses, les composés exothermiques ne peuvent se décomposer, tandis que les composés endothermiques ne peuvent se former. Comme on l'a dit sous une forme humoristique peu précise : le principe du travail maximum de la thermochimie est entièrement vrai au zéro absolu. Ceci revient à dire que, au-dessous d'une certaine température, variable avec les corps considérés, la réaction se passe dans le sens prévu par le principe; aussi celui-ci est-il très souvent d'accord avec les faits aux températures ordinaires, tandis qu'il en est autrement aux températures élevées, où, par exemple, l'acétylène prend naissance malgré l'absorption de la chaleur.

Des travaux récents de Nernst sont venus apporter des compléments très importants à la mécanique chimique. Le chimiste allemand a été conduit

à la loi suivante : Au zéro absolu, l'entropie de tout corps chimiquement homogène, solide ou liquide, possède une valeur déterminée. Comme il reste une constante arbitraire, on peut supposer que cette valeur est zéro. Il est donc possible, pour les corps indiqués, de parler de la valeur absolue de l'entropie. Entre autres conséquences du théorème de Nernst, signalons la conclusion que *la capacité thermique de tout corps chimiquement homogène, solide ou liquide, s'approche indéfiniment de zéro*, quand la température se rapproche du zéro absolu. Ce résultat surprenant a été confirmé par les mesures que l'on a pu jusqu'à présent effectuer.

La chimie des hautes températures n'est pas moins importante. Le four électrique résultant de l'arc voltaïque employé dans une enceinte close les réalise; il a été, entre les mains de M. Moissan, un outil incomparablement puissant. L'éminent chimiste a pu faire avec lui la sythèse du diamant, préparer un grand nombre de carbures métalliques, et, comme conséquence, obtenir par affinage, à l'état de pureté, des métaux seulement entrevus, comme l'uranium, le chrome, le manganèse, le tungstène et d'autres encore; par l'action de l'eau sur le carbure de calcium s'est développée l'industrie de l'acétylène. Pour les théoriciens, la chimie des hautes températures est, nous l'avons vu plus haut, d'une importance capitale : c'est elle qui a amené l'avènement de la Mécanique chimique nouvelle, appelant l'attention sur les phénomènes de dissociation.

L'emploi de l'électrolyse dans des conditions plus précises a été aussi un puissant moyen d'action. Il suffit de rappeler ici que, dans un appareil convenable et suffisamment refroidi, M. Moissan a obtenu le fluor libre, et, comme conséquence, une foule de dérivés dont un des plus curieux est le fluorure de soufre, gaz inerte, indécomposable par l'eau. Enfin l'emploi des métaux divisés ayant une très grande surface a été le point de départ de travaux importants. Des réactions spéciales qui ne se manifestent que très faiblement avec des lames, ont lieu facilement quand on remplace les lames par des poudres métalliques dont la surface est considérable : on a là une méthode générale pour la formation directe d'un grand nombre de composés.

Depuis longtemps déjà, on a montré que l'acide sulfurique peut être fabriqué par l'intermédiaire de la mousse de platine, l'acide sulfureux et l'oxygène se combinant ainsi directement, et ce procédé bouleversera sans doute quelque jour la préparation de l'acide le plus important pour l'industrie. On savait aussi que la mousse de platine provoque la réaction directe de l'hydrogène sur divers corps. Partant de là, M. Sabatier a, dans ces dernières années, créé de nouvelles méthodes générales d'hydrogénation directe par catalyse basées sur l'emploi des métaux divisés ; le nickel, récemment réduit de son oxyde, donne des résultats particulièrement satisfaisants. M. Sabatier attribue cette action *catalytique* du nickel à la formation temporaire d'un hydrure de nickel instable, qui se fait et se défait constam-

ment; entre bien d'autres synthèses il a ainsi réalisé la synthèse des pétroles. Rien n'est plus curieux que ces réactions et les exemples commencent à être nombreux, en chimie biologique comme en chimie pure, où une petite quantité d'une substance peut jouer un rôle utile pour ainsi dire indéfiniment.

La question de la transformation des corps simples les uns dans les autres est en Angleterre à l'ordre du jour, depuis la découverte incontestée faite par Ramsay de l'émanation du radium en hélium. Il faut toutefois apporter une grande prudence dans l'interprétation des expériences; ainsi la transformation annoncée du cuivre en lithium sous l'influence du radium n'a pas été confirmée. Peut-être cependant arrivera-t-on quelque jour à constater une sorte d'émiettement des poids atomiques les plus lourds, une *dégradation* des corps simples par échelons, les atomes les plus légers se formant par la destruction des atomes les plus lourds. En tout cas, de telles idées plus qu'hérétiques il y a vingt ans, ne paraissent plus absurdes et on admet aujourd'hui que les transformations successives du radium conduisent au plomb.

En attendant on mesure avec une précision de plus en plus considérable les poids atomiques des corps simples. Les nombres simples de jadis font place à des nombres plus complexes. Le poids atomique de l'oxygène étant *seize*, celui de l'hydrogène est actuellement *1,008;* après lui, c'est l'hélium qui a le plus petit poids atomique égal à *quatre*. La

revision des poids atomiques amène aussi à la découverte de nouveaux éléments. Jadis le didyme fut décomposé en néodyme et en praséodyme; récemment, M. Urbain a montré que l'ytterbium s'était formé de deux éléments nouveaux, le *néo-ytterbium* et le *lutecium*. Le chapitre des terres rares s'est considérablement accru, grâce aux recherches de cet éminent chimiste, et on connaît aujourd'hui avec précision les constantes atomiques d'éléments rares comme le *dysprosium* et l'*europium*. Il est vraiment curieux de comparer une table moderne des poids atomiques avec celle que l'on trouvait il y a vingt ans dans les traités. On n'y voit guère de nombres entiers; ainsi en face du cuivre on trouve le nombre 63,57 et en face du cobalt 58,97.

CHAPITRE VI

Minéralogie et Géologie.

I. La Cristallographie et la Minéralogie. — II. La Géologie.

I

LA CRISTALLOGRAPHIE ET LA MINÉRALOGIE

Nous ne sortirons pas encore du domaine des sciences physiques en jetant un coup d'œil sur la minéralogie et la géologie, en laissant toutefois de côté, dans celle-ci, la paléontologie qui trouvera sa place dans un autre chapitre.

Grâce au concours des mathématiciens, les cristallographes ont pu élucider certaines propriétés en rapport immédiat avec la structure moléculaire des corps cristallisés. Il y a trente ans, Soncke et Mallard avaient déjà généralisé la conception de Bravais sur la structure de ces corps, en montrant que le principe de l'homogénéité était sauvegardé, en substituant aux molécules symétriques de

Bravais des groupes de molécules asymétriques disposés symétriquement. Plus récemment, MM. Schœnflies et von Fedorow reprirent, en s'aidant des travaux de M. Jordan, la question au point de vue mathématique; ils recherchèrent tous les types de groupes de mouvement d'ordre fini; le groupement en sytèmes de polyèdres correspondants, de manière à remplir l'espace, épuise toutes les possibilités dans la recherche de la structure des cristaux. A vrai dire, quelques-uns seulement de leurs résultats sont à utiliser pour faire la théorie de toutes les propriétés découlant de la structure moléculaire. Dans cet ordre d'idées, les recherches de M. Wallerant ont élargi encore les cadres tracés par M. Haüy, et déjà successivement agrandis par Bravais et Mallard. Les groupes asymétriques de molécules, que M. Wallerant nomme particules fondamentales, en se groupant entre elles au moyen de rotations autour d'axes de symétrie et de renversements par rapport à des plans de symétrie, donnent naissance aux particules complexes qui possèdent des éléments de symétrie proprement dits et des éléments de symétrie limites; les premiers se retrouvent dans les corps cristallisés, les seconds deviennent les éléments de symétrie des groupements cristallins. Mais deux cas peuvent se présenter. Les éléments-limites peuvent faire entre eux les mêmes angles que les éléments de symétrie proprements dits d'un polyèdre, le groupemeut ne comprendra qu'un nombre limité de cristaux, et il pourra se faire que l'ensemble présente, dans sa

forme extérieure, l'aspect d'un cristal unique ayant dans sa forme cristalline une symétrie plus élevée que celle inhérente à chacun des cristaux composants. Il y aura, par suite, contradiction entre la symétrie extérieure et la symétrie révélée par d'autres propriétés telles que les propriétés optiques, et il en résultera en apparence des anomalies optiques. Si, au contraire, les éléments-limites ne font pas entre eux les mêmes angles que les éléments de symétrie d'un polyèdre, le groupement n'aura, comme éléments de symétrie, qu'une partie des éléments-limites de la particule complexe, tantôt les uns, tantôt les autres. Il pourra donc se produire plusieurs groupements.

Ce dernier résultat conduit à une explication du polymorphisme : si les particules fondamentales se groupent en particules complexes, c'est qu'elles possèdent des éléments-limites se transformant en éléments réels dans cette particule complexe. Il pourra donc, dans certains cas, se produire plusieurs sortes de particules complexes donnant naissance à plusieurs sortes de cristaux de symétries différentes, mais tels que les éléments de symétrie de l'un soient les éléments de symétrie des groupements de l'autre, et inversement.

Pasteur avait cru reconnaître la loi régissant les formes cristallines d'un corps polymorphe, en constatant que leurs réseaux différaient fort peu ; c'est là un fait exact, mais qui n'est pas spécial aux formes d'un même corps. Une étude approfondie des corps cristallisés les plus différents a permis à Mallard de

constater que les réseaux diffèrent fort peu d'un réseau cubique, et on peut dire que, dans les différentes formes cristallines, la symétrie totale est toujours celle d'un cube.

Il est clair que les représentations précédentes avec des particules fondamentales et les particules complexes rentrent dans le type général des théories, c'est-à-dire de systèmes d'images ayant pour objet de synthétiser les observations et de conduire parfois à la prévision de faits nouveaux. Comme toute théorie, ces représentations sont donc sujettes à discussions; celles-ci n'ont pas manqué et se continuent, car on n'apportera jamais une interprétation définitive dans des questions touchant à la physique moléculaire, ce qu'est véritablement la cristallographie. Ainsi, il n'y a pas une opinion unanime sur l'individualité de cette particule complexe, qui paraît jouer en cristallographie le même rôle que la molécule en chimie. On doit cependant reconnaître une grande valeur aux raisons données par M. Wyrouboff et par M. Wallerant en faveur de l'individualité, au moins relative, de la particule complexe, une des plus fortes étant fournie par l'étude des cristaux mous, comme ceux d'oléate d'ammoniaque, ou encore par les cristaux liquides. Sur bien des points il faut modifier les raisonnements un peu simplistes de la minéralogie classique; les lois d'Haüy et de Bravais n'ont rien d'absolu. On doit tenir compte des conditions de cristallisation; en modifiant celles-ci, on peut arriver à produire de nouvelles faces, et l'étude des faces courbes

devra quelque jour occuper les minéralogistes.

Je viens de faire allusion aux cristaux mous et aux cristaux liquides; leur découverte est certainement, dans le domaine de la cristallographie, le fait le plus marquant de ces dernières années: leur étude permettra de préciser les conditions auxquelles doit satisfaire la structure d'un corps pour posséder les propriétés d'un édifice cristallin. En particulier, les cristaux liquides nous amènent à nous demander si la répartition réticulaire des éléments constituants est nécessaire pour entraîner l'ensemble des propriétés physiques constatées dans les cristaux. Il y eut là de nombreux sujets de discussion. Les liquides anisotropes sont troubles; on a pu penser qu'ils ne sont pas homogènes et qu'il s'agit d'une émulsion, ou bien encore admettre l'existence de corps solides anisotropes en suspension. Aujourd'hui cependant, l'opinion des minéralogistes et des physiciens sur la matière cristallisée paraît à peu près unanime, et on regarde que les corps cristallisés peuvent présenter tous les degrés de cohésion. Un corps cristallisé est homogène et anisotrope. Certaines propriétés de la matière cristallisée sont continues, comme la vitesse de la lumière dans cette matière, la conductibilité calorifique, etc.; d'autres au contraire, comme il arrive pour les corps cristallisés solides, sont discontinus, telles que la propriété des faces planes, des plans de clivage, de la constance des angles des arêtes. Mais il n'en faut pas conclure que le second groupe de propriétés peut servir à caractériser les véri-

tables corps cristallisés à l'exclusion des autres, car certains corps comme l'azotate d'ammonium peuvent, suivant les conditions de cristallisation, les posséder ou non sans que les autres propriétés soient modifiées.

Ces problèmes de mécanique moléculaire dans les milieux symétriques sont de la plus haute importance : on y voit en quelque sorte la matière chercher à prendre des formes stables, variables d'ailleurs avec les conditions physiques, et les physico-chimistes ont cherché à rattacher leurs explications théoriques au principe de la moindre action. Ces recherches ont été inaugurées par Pasteur, et les mémoires de M. Gernez sur les cristallisations provoquées dans les liqueurs sursaturées, sont depuis longtemps devenus classiques; ces études sont cultivées aujourd'hui surtout en Allemagne.

On est assez porté actuellement à regarder un cristal comme une sorte d'être vivant, susceptible d'accroissement, et réparant ses pertes quand il a été blessé: les mots mêmes provoquent ici la comparaison. Il y a là un rapprochement artificiel, et il ne paraît pas légitime de comparer la formation cristallographique, qui marche uniformément dans le même sens, avec l'assimilation et la désassimilation périodiques qui sont la caractéristique des phénomènes vitaux; le cristal absorbe et n'excrète pas.

D'une manière plus générale, on parle assez couramment aujourd'hui de la *vie de la matière*, en entendant par là les transformations souvent très lentes qui se produisent dans des milieux qui parais-

sent en équilibre. C'est ainsi qu'un thermomètre dont le zéro se déplace devient un être vivant, ou encore le morceau d'étain gris atteint d'une sorte de maladie contagieuse, bien connue des constructeurs d'orgues, transmissible aux morceaux d'étain voisins, maladie que la chaleur peut heureusement guérir. On a imaginé aussi une mémoire de la matière qui se souvient de ses états antérieurs et s'arrange en conséquence. Au lieu de vie et de mémoire, il vaudrait mieux simplement parler d'hérédité, au sens où nous l'avons entendu dans un chapitre précédent; il est impossible dans ces phénomènes de conserver l'hypothèse de non-hérédité qui, nous l'avons dit, est à la base de la mécanique classique. Je me suis déjà expliqué antérieurement sur cette mécanique avec hérédité, où se présenteront, semble-t-il, les équations fonctionnelles plus compliquées que les équations différentielles auxquelles nous sommes habitués. Elles renfermeront, ai-je dit plus haut, des intégrales qui seront le témoignage d'une sorte d'hérédité. Le même mot *intégrale* vient aussi sous la plume des biologistes, quand ils parlent de l'hérédité. « Elle est, dit M. Giard [1], une intégrale : c'est la somme des variations produites sur chaque génération antérieure par les facteurs primaires de l'évolution ». Dans les rapprochements signalés, un mécanicien ne doit voir rien de plus que *cette hérédité*; il est amusant sans doute, mais bien inutile, de parler là de *vie* et de *mémoire*.

1. A. Giard. *Le principe de Lamarck et l'hérédité des modifications somatiques. Controverses transformistes*, page 35.

N'ayons pas l'air d'expliquer *obscurum per obscurius.*

Nous venons d'envisager succintement une partie de la minéralogie qui, sous le nom de cristallographie, est véritablement la physique moléculaire des milieux symétriques. Nous n'avons pas à nous arrêter à cette subdivision de la minéralogie qu'on appelle la minéralogie descriptive, mais il est une partie de la minéralogie nommée *pétrographie*, qui comprend l'étude des phénomènes volcaniques anciens et modernes, et qui est de grande importance. Lorsque Sorby eut l'heureuse idée d'appliquer l'examen microscopique à l'étude des roches, on constata tant de faits insoupçonnés que, dans l'enthousiasme des premières recherches, on put espérer résoudre tous les problèmes que soulevait la genèse des roches éruptives. On fit passer sous le microscope les roches les plus diverses, et l'on put ainsi constater qu'elles se ramenaient à un petit nombre de types réunis par tous les intermédiaires. Il semble d'abord étonnant que l'on puisse regarder au microscope à travers un granit ou un basalte, mais on taille des lames dont l'épaisseur est d'environ deux centièmes de millimètre, et c'est un curieux spectacle que celui de la marquetterie présentée par ces plaques minces ; il est hautement instructif pour le pétrographe, qui fait ainsi l'analyse des éléments composant la roche. On aperçoit parfois sous le microscope des inclusions, liquides ou gazeuses, qui peuvent renseigner sur les conditions dans lesquelles s'est opérée la solidification. Les travaux de

MM. Fouqué et Michel Lévy sur ces sujets sont devenus classiques.

Les études précédentes ne suffisent pas cependant pour opérer une classification naturelle. En réalité, la genèse des roches ne peut être complètement élucidée que par leur reproduction synthétique, le microscope intervenant pour identifier les produits artificiels avec les produits naturels. Un grand pas a été fait dans cette voie par MM. Fouqué et Michel Lévy qui ont obtenu, dans leur laboratoire, des roches microlithiques basiques, identiques aux roches naturelles, comme l'anorthite, le péridot, l'oligoclase et bien d'autres; ces remarquables expériences ont montré l'importance du rôle de la fusion ignée dans la cristallisation des roches, fusion suivie d'un lent refroidissement. Jusqu'ici les roches acides à quartz, mica, etc., comme le granit, ont été réfractaires à toute reproduction. Ce n'est pas que la synthèse simultanée du quartz et de l'orthose n'ait pas été faite; elle a été réalisée, en 1879, par Friedel, en faisant intervenir des carbonates alcalins comme minéralisateurs, et antérieurement on avait pu obtenir des cristaux de quartz en faisant agir sur les silicates la vapeur d'eau comprimée. Dans ses belles études sur les phénomènes volcaniques de la Martinique, M. Lacroix a constaté la formation du quartz sous l'action de la vapeur d'eau comprimée, ce qui est bien en accord avec les expériences précédentes.

II

LA GÉOLOGIE

Depuis vingt ans, les études géologiques se sont aussi profondément modifiées. Rebutés par l'insuccès des tentatives de synthèse de Léopold de Buch et d'Elie de Beaumont, les géologues s'étaient volontairement contraints à rester dans le domaine de l'observation pure, rejetant systématiquement toute conception théorique. Ils perdaient ainsi de vue le but que se propose la géologie, c'est-à-dire la reconstitution de l'histoire de notre globe. Les recherches, faites sans but précis, les amenaient à constater de nombreux faits qui restaient isolés, sans liens et, il faut le dire, sans grand intérêt. Ce n'est pas qu'aujourd'hui on ait renoncé à l'observation; elle est, au contraire, d'autant plus active que les progrès de la civilisation la rendent plus facile. La construction des chemins de fer, le creusement des tunnels, la recherche des substances utiles à l'industrie permettent de résoudre bien des problèmes d'importance locale. D'autre part, les explorateurs en pénétrant dans les régions inconnues, ont ouvert un nouveau champ aux recherches géologiques. Grâce aux voyageurs anglais et russes, on possédera bientôt des données précises sur l'Asie centrale. De leurs côtés, les services géologiques des États-Unis et du Canada défrichent, tous les ans, une partie de leurs immenses territoires, la recherche

de l'or et du diamant en Afrique et en Australie, a eu aussi pour résultat de faire connaître, tout au moins dans leurs grands traits, la constitution de ces continents. Enfin, l'épopée de M. Nansen à travers les régions polaires, en faisant connaître, entre bien d'autres résultats, l'existence d'une mer profonde dans les régions arctiques boréales, apporte une contribution importante à la géologie.

Mais tous ces résultats isolés ne présentent qu'un intérêt restreint, et il eût même été à craindre que leur accumulation ne rendît inabordable l'étude de la géologie. Il était indispensable de les relier, de les coordonner, d'en faire sortir des vues d'ensemble sur l'histoire de la terre. Ce fut, depuis quinze ou vingt ans, l'œuvre de M. Suess et de ses adeptes. Il convient, toutefois, de ne pas être injuste envers les systèmes précédents; les théories nouvelles, nous le savons, sont toujours faites des débris des théories qui les ont précédées, et nous ne devons pas oublier que Léopold de Buch et Élie de Beaumont ont été de grands précurseurs.

On doit à M. Suess un ouvrage magistral, l'*Antlitz der Erde*, qui est aujourd'hui le livre de chevet de tous les stratigraphes. « Avant tout, dit M. Marcel Bertrand, dans la préface de la traduction française de ce volume, M. Suess cherche à établir que les montagnes ne résultent ni de soulèvements opérés de bas en haut, ni de compressions latérales produites par les roches éruptives; ces dernières n'ont joué partout que le rôle d'éléments passifs. C'est l'abandon du système de Léopold de Buch. Par con-

tre, le dernier chapitre montre, comme conclusion d'ensemble, qu'il n'y a trace, à la surface du globe, d'aucun arrangement géométrique; le dessin des chaînes, comme celui des contours océaniques, présente des irrégularités dont l'origine ne doit être rattachée qu'à quelque dissymétrie primitive et accidentelle, peut-être, par exemple, à la forme et à la distribution des premiers îlots de scories qui se sont épaissis à la surface de notre planète; c'est-à-dire qu'il faut renoncer à la recherche de lois factices et illusoires. C'est le système d'Elie de Beaumont qui, à son tour, est condamné. »

M. Suess a été le premier à distinguer les différents types de dislocation et à les répartir en deux catégories, d'après la nature des forces qui leur avaient donné naissance. Quand une partie de l'écorce terrestre manque d'appuis, par suite de la contraction de la masse centrale, elle se trouve soumise à une force verticale, la pesanteur, et à des réactions tangentielles : d'où deux catégories de dislocations. Sous l'influence des forces verticales, il se produit des cassures verticales accompagnées de dénivellations, autrement dit des failles. Celles-ci sont rarement isolées, elles se rencontrent en grand nombre dans une même région et dessinent grossièrement des polygones concentriques à cette région. Dans toutes, la dénivellation se produit du côté du centre de la région, qui est, par suite, le point le plus affaissé. Une telle région a reçu le nom de bassin d'affaissement. Quand deux bassins sont dans le voisinage l'un de l'autre, ils sont séparés

par une région non affaissée qui a reçu le nom de *horst*. Ainsi le bassin de Paris est séparé par les Vosges de la vallée du Rhin qui est aussi un bassin d'affaissement. Il y a lieu de remarquer que, grâce à ces failles, il y a extension des couches. Au contraire, sous l'influence des forces tangentielles, il y a compression : les couches se plient et, si la poussée tangentielle est suffisante, il se produit des fractures sensiblement horizontales permettant le chevauchement des couches superficielles sur les couches profondes.

Ces plis ne sont d'ailleurs pas non plus isolés; ils affectent des zones très allongées relativement à leur largeur. Dans ces zones, dites *zones de plissement*, certains groupes de plis parallèles sont surélevés et forment ce que nous appelons des chaînes de montagnes, et l'on a généralement le tort de considérer comme indépendantes les chaînes d'une même zone, quoiqu'elles aient même origine. Dans une zone, les plis peuvent ne pas être rectilignes : par suite de l'existence d'obstacles préexistants, ils ont pu s'infléchir; mais, dans ce cas, le changement de direction se fait toujours d'une manière continue, contrairement aux idées émises par Élie de Beaumont. Ce principe de continuité, établi par M. Suess, lui a permis de suivre une même chaîne à travers l'Europe et l'Asie, de montrer que des montagnes considérées jusqu'alors comme indépendantes n'étaient que des fragments d'une même chaîne : il a ainsi établi les liens existant entre les Pyrénées, les monts de Provence, les Alpes, les Carpathes, les

Balkans, le Caucase, le Pamir, l'Himalaya. Cette chaîne n'est d'ailleurs que la limite nord d'une zone de plissement limitée au sud par d'autres chaînes, telles que l'arc constitué par la chaîne Bétique au sud de l'Espagne, qui se continue par l'Atlas, la Sicile et l'Apennin. Au milieu de cette zone s'est produit un bassin d'affaissement constituant aujourd'hui la Méditerranée occidentale. Outre cette première zone, M. Suess a pu reconstituer deux autres zones de plissement plus anciennes, l'une s'étendant du sud de l'Irlande à la Bohême et au Thian-Chan, l'autre allant de l'Écosse à la Scandinavie.

Aux trois chaînes de M. Suess, M. Marcel Bertrand en ajoute deux autres plus anciennes et plus septentrionales. Montrant les relations d'âges existant entre ces chaînes et les phases éruptives, il fait disparaître l'antagonisme entre l'école allemande et l'école française, au sujet de la relation entre les caractères et l'âge des roches. M. Suess avait donné le coup de grâce au système pentagonal d'Élie de Beaumont. M. Bertrand lui substitue le système orthogonal en montrant que les zones de dislocation sont sensiblement parallèles soit à l'équateur, soit aux méridiens; il met aussi en évidence le rôle capital joué par les nappes de charriage dans la surrection de toutes les chaînes. Suess et Marcel Bertrand ont été ainsi les fondateurs de la tectonique moderne qui a rendu compte de tant de difficultés insolubles jusque-là pour les stratigraphes. Dans la formation d'une chaîne de montagnes, comme la chaîne alpine, les efforts tangentiels ont joué le rôle pré-

pondérant; l'édification de cette chaîne résulte en somme du refoulement d'un pays qui graduellement se plisse contre le bord inébranlable d'un avant-pays. Un refoulement venu du Sud fournit pour les Alpes l'explication de tous les phénomènes de recouvrement, et dans certaines parties des Alpes orientales ces lambeaux de recouvrement, longs parfois de quatre cents kilomètres, viennent, comme l'a montré M. Termier dans sa synthèse générale des Alpes, d'une zone de racines située à cent kilomètres plus au Sud.

A côté des mouvements de l'écorce solide, M. Suess considère à part ceux de l'enveloppe liquide; il signale l'importance des développements des rivages des mers à un moment donné et montre que périodiquement se sont produites de grandes transgressions marines, dont on retrouve des traces sur presque toute la surface de la terre. Les tentatives de reconstitution des anciennes mers peuvent d'ailleurs maintenant s'appuyer sur des données plus précises, grâce aux explorations géologiques dans des contrées restées jusqu'alors inconnues à ce point de vue; c'est un travail auquel divers géologues, et en particulier M. de Lapparent, se sont livrés avec le plus grand succès, et on peut voir dans la dernière édition de son magistral traité de géologie, une esquisse de la terre et des mers à chaque période géologique. Le progrès a été surtout sensible dans les pays voisins de la zone arctique; il s'y est fait des découvertes inattendues, notamment en ce qui concerne l'extension septentrionale des diverses mers

jurassiques. On connaît aujourd'hui, au moins dans ses grands traits, la géographie physique de la terre pour chaque période de son évolution. Alliée à la géologie, la géographie est ainsi complètement transformée; la nouvelle école géographique s'est donné pour tâche d'expliquer la genèse de toutes les formes terrestres, en insistant particulièrement sur la notion des cycles d'érosion, et la question d'âge a pris pour les formes topographiques une importance capitale.

J'ai fait allusion tout à l'heure à la notion du tétraèdre de Lowthian Green, c'est-à-dire à une théorie tétraédrique de la figure de la Terre, assez en faveur aujourd'hui, qui cherche à expliquer la distribution actuelle des continents et des mers. L'écorce terrestre, en se refroidissant, aurait tendu à prendre la forme d'un tétraèdre, dont un sommet serait approximativement au pôle sud, et les trois autres dans les massifs continentaux de l'Europe-Afrique, de l'Asie-Océanie et de l'Amérique, massifs qui se terminent en pointe vers le sud, et répondent sensiblement aux arêtes du tétraèdre. Entre les trois massifs continentaux s'étendent trois nappes océaniques, répondant à trois des faces planes du tétraèdre, et qui sont l'Atlantique, l'Océan Indien et l'Océan Pacifique. La face nord du tétraèdre correspondrait aux mers profondes des régions arctiques septentrionales, dont le voyage de Nansen a d'ailleurs démontré l'existence. Le pôle sud de la terre serait au contraire une saillie, ce qui est d'accord avec l'existence des terres émergées dont l'existence ne semble guère douteuse depuis les voyages du milieu

du siècle dernier. Bien entendu, l'assimilation de la surface terrestre à un tétraèdre est d'une géométrie approximative, les parties trop saillantes ayant été usées. Cette théorie rend compte de beaucoup d'autres faits. Par suite de la rotation diurne, il y a eu une torsion du tétraèdre qui explique la déviation vers l'est des prolongements de l'hémisphère sud par rapport aux masses continentales de l'hémisphère nord; de plus, cette torsion a amené une sorte de dislocation qui donne la raison de la grande dépression intercontinentale, formée par la Méditerranée, la mer des Antilles et les mers de l'archipel Polynésien. Enfin on peut rattacher à la théorie de Green la répartition des volcans; ils se trouvent dans les régions de moindre résistance environnant les arètes du tétraèdre et la dépression intercontinentale.

La surface de la terre est dans un perpétuel état de tassement et de déformation, dû à la contraction du globe terrestre. Le sol, qui paraît si fixe sous nos pieds, est en réalité dans une agitation presque constante : c'est ce qu'a montré la *sismologie*, ou étude systématique des tremblements de terre. Cette branche un peu spéciale de la géologie a réalisé dans ces derniers temps des progrès considérables, et des faits extrêmement curieux ont été mis en évidence par l'observation des sismographes, c'est-à-dire de pendules, mobiles autour d'axes horizontaux ou verticaux, convenablement disposés. De l'ensemble des observations il résulte que, quand un point est ébranlé, on peut se représenter de la manière suivante la propagation de l'ébranlement.

La transmission des ondes sismiques se communique au point antipode par l'intérieur du globe terrestre, et par la surface terrestre. L'onde centrale se compose en réalité de deux ondes simples arrivant respectivement aux antipodes à peu près vingt et quarante minutes après l'ébranlement, tandis que l'onde superficielle met environ une heure.

Il y a d'ailleurs sur la surface terrestre des régions favorisées au point de vue sismique. C'est un résultat important que ces régions favorisées se trouvent dans les parties de l'écorce terrestre où la pente moyenne des accidents du relief est considérable. Elles sont en général situées dans l'océan, non loin des rivages qui dominent les hautes chaînes de montagnes et au-dessus d'abîmes sous-marins, où la sonde accuse de très grandes profondeurs; c'est ce qui arrive pour le Japon et pour le littoral américain entre le Pérou et le Chili. La dépression intercontinentale est aussi favorisée au point de vue sismique. Telles sont en particulier les régions méditerranéennes, où les tremblements de terre sont si fréquents, et où on n'a vu que trop souvent des villes comme Messine entièrement anéanties.

CHAPITRE VII

Physiologie et Chimie biologique.

I. La Physiologie. — II. La matière vivante et les théories physico-chimiques. — III. La Chimie biologique.

I

LA PHYSIOLOGIE

Nous arrivons enfin aux sciences de la vie. Nous avons déjà eu de grandes difficultés à donner une idée des divers points de vue auxquels on peut se placer quand on parle d'*explication* dans les sciences physico-chimiques. On peut penser combien les questions analogues deviennent plus difficiles quand il s'agit des sciences biologiques. Aussi, dans ces sciences, entend-on actuellement le mot *explication* de deux manières différentes ; ce sera d'abord le mot pris au sens où cherchent à l'entendre les mécaniciens et les physiciens, et, en second lieu, surtout

dans certains chapitres de la zoologie, on regardera parfois une *narration historique* comme une explication se bornant, faute de mieux, à raconter une évolution dont on ne peut préciser les causes.

En quoi consiste la vie? Les phénomènes vitaux diffèrent-ils essentiellement des phénomènes que nous observons dans la nature inanimée? Il n'est plus de biologistes restés attachés aux doctrines des anciennes écoles vitalistes, du moins sous leurs premières formes, mais il en est encore qui pensent, comme Claude Bernard, que la matière n'engendre pas les phénomènes qu'elle manifeste, et ils admettent, avec le grand physiologiste, un principe d'ordre, une idée directrice; ce qui ne les empêche pas, d'ailleurs, de poser en principe le déterminisme physiologique des phénomènes que l'on étudie, déterminisme sans lequel il n'est pas de science. Ces physiologistes ne cherchent pas à entrer, si je puis dire, dans la *théorie* des phénomènes vitaux; je serais tenté de les rapprocher des partisans de l'énergétique purement expérimentale, dont je parlais dans un précédent chapitre. Une comparaison éclaircira ce rapprochement. De nombreux physiciens, avons-nous dit, ne se préoccupent pas de savoir si la chaleur est ou non un mode de mouvement; ils n'en appliquent pas moins les lois générales de la thermodynamique qui sont indépendantes d'hypothèses spéciales sur la nature de la chaleur. Pareillement, ils ne se posent aucune question sur ce que c'est que l'électricité; ils n'en bâtissent pas moins, avec Helmholtz et Gibbs, une théorie de la pile, et, de ce

que l'énergie mécanique est transformable en énergie électrique, ils ne cherchent pas à conclure une explication mécanique de l'électricité. On peut apporter les mêmes tendances d'esprit dans l'étude des phénomènes vitaux. A ce point de vue, les questions de doctrine ne se posent pas. Pour certains, il peut être indifférent qu'il y ait ou non dans les phénomènes vitaux une forme spéciale de l'énergie; si une telle forme existe, elle viendra se placer à côté des autres formes d'énergie déjà considérées.

Des travaux de la plus haute importance ont été faits dans cet ordre d'idées, que leurs auteurs se rattachent, d'ailleurs, à une doctrine philosoqhique ou à une autre. Le point essentiel est ici d'établir des relations d'équivalence entre différentes formes d'énergie. Parmi elles, se trouvent ces sortes d'énergie que quelques-uns appellent encore vitales et qui correspondent au travail que M. Chauveau appelle physiologique. Elles sont relatives aux phénomènes qui s'accomplissent dans les tissus en activité, et qu'on ne peut pas encore ramener d'une manière nette aux types connus des phénomènes physiques, chimiques et mécaniques; elles correspondent, par exemple, à ce qui se passe dans le nerf qui conduit l'influx nerveux, ou dans le muscle qui va se raccourcir. Ainsi, on ne peut admettre qu'un muscle fonctionne comme une machine thermique, et on en a conclu que les faits connus, relatifs à la contraction musculaire, sont compatibles avec l'idée de la transformation directe de l'énergie chimique en une forme spéciale d'énergie physiologique;

d'ailleurs, dans tous ces phénomènes, on retrouve le plus souvent, comme forme de déchet, l'énergie calorifique, cette forme dégradée de l'énergie, qui se dissipe ou joue le rôle d'amorçant dans les réactions chimiques. Des points restés très obscurs ont été éclairés par cet énergétique biologique. Il suffira de rappeler les beaux travaux de M. Chauveau sur l'énergie dépensée par le travail intérieur des muscles dans leurs différents modes de contraction, et sa classification de la valeur énergétique des aliments, en les classant en bio-thermogènes et simplement thermogènes.

Il faut bien noter que la transformation *directe* de l'énergie chimique en énergie physiologique, sans passer par la forme dégradée de l'énergie calorifique, n'a rien de plus étonnant que ce qui se passe dans une pile électrique, où nous voyons l'énergie chimique transformée en énergie électrique sans passer par la forme calorifique. Il y a, par ailleurs, des cas où l'énergie dépensée se retrouve seulement en chaleur, comme dans ces dépenses constituant le prix de l'effort statique et dont nous voyons un exemple, en dehors des êtres vivants, dans le fonctionnement du frein dynamométrique de Prony.

Il n'est pas sans difficultés de supposer que muscle, glande, nerf aient chacun une énergie conforme à leur fonction. Aussi les idées sur ces formes spécifiques d'énergie sont-elles peu à peu abandonnées, les uns ne se souciant que de relations d'équivalence et retenant seulement, s'ils sont restés attachés à la pensée citée plus haut de Claude Bernard,

l'idée d'une direction dans les mutations d'énergie, les autres, c'est-à-dire la majorité des biologistes actuels, poussant jusqu'au bout la thèse physico-chimique.

Une des parties les plus importantes de la physiologie est la physiologie des nerfs. En se bornant seulement aux dernières années, on remplirait une bibliothèque avec les travaux relatifs au système nerveux, mais il faut avouer que l'impression est assez confuse qui se dégage de la conclusion des mémoires les plus importants. C'est en tant qu'instrument de la solidarité des parties de l'organisme que le système nerveux intéresse surtout la physiologie ; il constitue entre ces diverses parties un immense réseau de communications. Les comparaisons abondent pour donner une idée du rôle du système nerveux, on les emprunte souvent maintenant à la téléphonie, la station obligatoire dans un centre nerveux encéphalo-rachidien correspondant au poste central. On s'est naturellement demandé quel est le processus intime de l'excitation. Il est généralement admis que le stimulus nerveux joue le rôle d'amorce; il y a un déclanchement et, par exemple, le rapport de l'énergie excitante à l'énergie fournie par le muscle est extrêmement petit.

Si, après l'excitation, nous arrivons à la conduction, bien des problèmes se posent, sujets à discussion, sur la nature de l'influx nerveux. L'assimilation avec un courant électrique se présentait naturellement, mais cette hypothèse est abandonnée aujourd'hui; la question de la possibilité de la propagation

dans les deux sens n'est même pas résolue par tous de façon identique. La vitesse de conduction de l'influx nerveux a pu être mesurée dans beaucoup de cas ; elle est très lente, variant de soixante-dix mètres à huit mètres par seconde. Quelle est la nature de cette *onde nerveuse ?* Beaucoup admettent qu'elle est de nature électrolytique, c'est-à-dire que le courant nerveux n'est au fond qu'un déplacement d'ions, continué de proche en proche. Le nerf est ainsi assimilé à un électrolyte de constitution non uniforme, le transfert d'énergie se faisant de l'endroit où la concentration est plus forte à celle où elle est plus faible ; M. Lehmann a réalisé ainsi des sortes de nerfs artificiels avec des chaînes de piles. Ce qui nous intéresse dans de telles interprétations, c'est la tendance générale à ramener les phénomènes vitaux aux phénomènes physiques et chimiques ; les noms de bio-physique et de bio-chimie doivent même, pour quelques-uns, remplacer celui de physiologie. Nous reviendrons sur cette orientation capitale pour les recherches modernes à propos des théories physico-chimiques de la vie.

L'anatomie et l'histologie du système nerveux ont fait beaucoup plus de progrès que la physiologie de ce système ; de nombreuses et patientes recherches y ont considérablement accru nos connaissances dans ce domaine. Un premier pas important avait été fait, quand on avait constaté que la fibre nerveuse, ou du moins la partie essentielle de la fibre, celle qui en occupe l'axe, le cylindre-axe n'est qu'un prolongement, qui peut atteindre des dimensions

considérables, de la cellule nerveuse. Celle-ci devient donc l'élément essentiel; outre son cylindre-axe, la cellule nerveuse présente des ramifications très nombreuses. Quel est le mode de communication des cellules entre elles? Pour les uns, les cellules nerveuses confondent en un réseau soit leurs prolongements protoplasmiques, soit leurs ramifications cylindro-axiles; d'autres nient l'existence d'un réseau et s'attachent à établir la doctrine des *neurones*, c'est-à-dire des cellules nerveuses individualisées, dont les prolongements entrent seulement en contact par leurs extrémités : entre les deux opinions, le procès est toujours pendant. Remarquons que, dans les recherches de ce genre, la technique joue un rôle essentiel, certains réactifs permettant de voir des éléments qui jusque-là n'ont pu être mis en évidence. L'emploi des procédés, comme celui de Golgi au chromate d'argent et celui de Ehrlich au bleu de méthylène, ont été l'origine de découvertes capitales. Une autre question de haute importance, encore controversée, est celle de la non-régénération des cellules nerveuses détruites. Il est cependant très probable que le tissu nerveux est un tissu à éléments perpétuels, incapable de multiplication et de régénération ; ainsi, le tissu noble par excellence ne pourrait pas se reformer, résultat de grande conséquence pour le mécanisme de la sénilité.

Dans ce vaste domaine de la physiologie, je ne peux que jeter quelques coups d'œil sur ma route; je signalerai seulement l'invasion des instruments de physique et de mécanique dans les laboratoires

de physiologie; il existe aujourd'hui une physique des nerfs, des muscles et des organes des sens, une mécanique du squelette, de la circulation et de la respiration, due surtout aux travaux si élégants et si précis de M. Marey.

II

LA MATIÈRE VIVANTE ET LES THÉORIES PHYSICO-CHIMIQUES

Les travaux précédents sont surtout relatifs à un organe pris dans son ensemble chez un animal, et concernent donc la vie d'ensemble des cellules qui le composent, ce qui a été le premier objet de la physiologie classique. Une autre tendance dans les recherches s'est manifestée depuis longtemps déjà en physiologie. On a cherché à créer une physiologie cellulaire, en étudiant les propriétés physiologiques de la cellule. Ce sont les propriétés mêmes de la vie pour les êtres unicellulaires ; chez les êtres pluricellulaires, aux propriétés élémentaires des cellules qui les composent, devront s'ajouter les actions des cellules les unes sur les autres, car un être vivant est autre chose qu'une juxtaposition de cellules. D'après Claude Bernard, le caractère le plus général auquel se reconnaît un être vivant est l'échange qu'il entretient avec son milieu. En fait, tous les caractères de la matière vivante, son équilibre mobile, son organisation chimique et anatomique sont regardées aujourd'hui par la grande majorité des biologistes comme des propriétés secondaires par

rapport à la *nutrition*, qui est l'attribut essentiel de la vie. La nature des échanges entre l'être vivant et son milieu, c'est-à-dire la physiologie de la nutrition a fait l'objet de travaux considérables, dont on trouvera une très intéressante étude critique dans le livre de Dastres sur *la Vie et la Mort*. On y verra combien le sujet prête encore à la discussion. Les physiologistes, notamment, ne sont pas unanimes sur la question du renouvellement de la substance réellement vivante ; beaucoup admettent que, dans un organe à l'état adulte, le protoplasma vital se détruit peu, comme le formulait, dès 1881, M. Armand Gautier ; M. Chauveau a comparé l'usure d'une cellule vivante, au moins dans les muscles, à celle des organes d'une machine à vapeur qui s'altèrent seulement avec une grande lenteur. La plus grande partie des aliments, après son élaboration par la matière vivante, forme les réserves, comme le glycogène, les graisses, etc. Pour M. Le Dantec, on ne doit pas séparer *a priori* le fonctionnement et l'évolution individuelle ; à l'axiome de destruction fonctionnelle, M. Le Dantec substitue la loi d'assimilation fonctionnelle, qui veut que tout fonctionnement soit constructif, et il voit une démonstration inattaquable de cette loi dans la sérothérapie et dans les modifications imprimées aux organismes par les vaccinations.

On pourrait parler ici des fermentations, en rappelant que Claude Bernard voyait dans la vie une fermentation. Elles jouent, dans le mécanisme vital, le premier rôle, et c'est une idée aujourd'hui courante

que la vie est sous la dépendance d'un ensemble de fermentations se produisant dans les cellules et les plasmas de l'être vivant. On commence à pénétrer un peu dans le détail de certains actes fermentatifs ; nous en dirons un mot en chimie biologique.

J'ai dit plus haut que, pour la majorité des biologistes, les phénomènes vitaux se ramènent aux phénomènes physico-chimiques. Les doctrines vitalistes, même considérablement atténuées, deviennent, en effet, de moins en moins fécondes, et c'est un embarras, semble-t-il, que de maintenir une *idée directrice*, qui ne peut entrer dans aucune équation et ne peut, par suite, servir pour aucune prévision. Mais il ne faut pas croire que les choses soient devenues très claires et très faciles, parce qu'on se place au point de vue physico-chimique. On a dû peu à peu reconnaître que ce sont les parties de la physico-chimie les moins élaborées qui sont appelées à fournir en biologie les explications les plus importantes. Certaines conquêtes sont éclatantes, tel, par exemple, le rôle de l'osmose dans les phénomènes physiologiques, notamment dans la croissance des plantes, ou encore dans la fonction des globules rouges du sang, trouvée en relation étroite avec la pression osmotique du liquide qui les baigne. Mais, quand on veut pénétrer dans la mécanique de la cellule, on se trouve en présence des éléments du protoplasma, c'est-à-dire de corps de la nature des *colloïdes* dont l'étude, quoique commencée depuis longtemps par Graham, n'a été reprise que récem-

ment, en profitant des ressources de la technique moderne.

La biologie a été vraiment une excitatrice pour la physico-chimie; sans reparler de l'énergétique qui fut d'abord biologique avec Robert Mayer, nous avons vu la théorie des *solutions vraies* se développer à la suite des observations de Pfeffer, et maintenant les physico-chimistes sont incités par des problèmes physiologiques à des recherches sur les *solutions colloïdales*. Il semble que de véritables *théories de la vie* ne pourront être édifiées, si toutefois on peut y parvenir, tant que l'étude des colloïdes n'aura pas fait de nouveaux progrès; il y a d'ailleurs lieu d'espérer que, quoi qu'il advienne, la biologie tirera grand parti de ces progrès. Les colloïdes attirent d'autant plus l'attention qu'ils semblent une image de la matière vivante; ils sont comme elle, en une évolution perpétuelle qui ne tend pas à les fixer dans un état stable. On peut regarder comme bien probable que l'électrisation de contact joue un rôle important dans les mouvements des colloïdes; c'est là du moins une opinion émise par divers auteurs et discutée par M. Jean Perrin dans ses travaux sur l'osmose électrique. En particulier, certaines divisions observées dans le développement de la cellule et dont nous aurons à parler dans le chapitre suivant, trouveront peut-être une explication, au moins partielle, dans l'électrisation à la surface de contact des granules protoplasmiques avec le milieu aqueux; les tensions superficielles varient avec l'acidité de ce milieu, et l'accroisse-

ment de surface tend à la dislocation des granules. Il est légitime de compter, pour donner à ces vues une base expérimentale, sur la vision ultramicroscopique, dont nous avons parlé plus haut; grâce à elle, on a pu apercevoir des granules dans les solutions colloïdales.

Quand bien même l'avenir montrerait qu'il faut en rabattre des espérances suscitées par des comparaisons peut-être trop hâtives, le désir d'explications physiques des phénomènes vitaux n'en aura pas moins provoqué un mouvement expérimental très important dans des parties restées jusqu'ici fort troubles de la physico-chimie. Sur des sujets d'une telle complication, il faut d'ailleurs apporter beaucoup de prudence, et se méfier de ces chercheurs trop simplistes, qui s'exclament devant une émulsion où apparaissent des sortes de cellules, croyant avoir fait une synthèse de la matière vivante. C'est ainsi que les mouvements spontanés offerts par ces émulsions et dus à des changements locaux de la tension superficielle présentent un tout autre mécanisme que celui des amibes, auquel on avait été tenté de les comparer. Nous pourrions redire encore ce que nous avons dit en général des théories. Ici plus qu'ailleurs, il pourrait être question *d'images*, et il ne faut pas être dupes des schèmes trop simplifiés par lesquels on voudrait représenter l'être vivant; s'ils rendent pendant un temps des services à la science, ils peuvent ensuite retarder ses progrès. La chaîne des approximations sera longue en des matières aussi ardues.

III

LA CHIMIE BIOLOGIQUE

La chimie biologique est devenue de nos jours une science spéciale, ayant ses chaires et ses laboratoires : elle a pour objet l'étude des phénomènes chimiques de la vie. Dans la chimie des êtres vivants, les méthodes ne peuvent être autres que dans la chimie des corps minéraux et des corps organiques, mais les problèmes sont encore plus délicats. Une question intéressante est celle de la connaissance de la composition immédiate des animaux et des plantes. De nombreux principes immédiats ont été découverts et ont mis en évidence d'importantes relations ; on s'efforce de suivre leur synthèse et leur destruction dans les organismes. Comment avec de l'eau, de l'acide carbonique et des sels minéraux, la plante, par exemple, peut-elle former des combinaisons complexes, comme les hydrates de carbone, les sucres, l'amidon, l'albumine? Il s'en faut qu'on puisse encore répondre à toutes ces questions, mais cependant des résultats considérables ont été obtenus, modifiant en bien des points les idées reçues ; en particulier, la formation des hydrates de carbone dans l'action chlorophyllienne serait beaucoup plus complexe qu'on ne l'avait cru, de l'aldéhyde méthylique se formant et donnant par polymérisation les hydrates de carbone. Il est inutile d'insister sur l'intérêt qu'il y a à suivre les évolutions de la matière

dans les corps vivants et à étudier en même temps les énergies mises en œuvre dans ces transformations. Avec ces problèmes, nous nous trouvons dans le grand courant d'idées qui a été si fécond en physique et en chimie, et l'on comprend alors que l'on puisse parler de biochimie.

Avec Pasteur et ses premiers disciples, la chimie biologique s'occupait surtout des fermentations. Leur importance dans le mécanisme vital apparaît de plus en plus grande, mais les points de vue se sont élargis. Tout d'abord, on constata que la fermentation n'est pas l'attribut exclusif de certains êtres organisés, et que toute cellule est susceptible, dans des conditions convenables, de produire des fermentations; c'est ainsi, comme l'a autrefois observé Lechartier, que des fruits mûrs mis à l'abris de l'air, dans une atmosphère d'acide carbonique, donnent de l'alcool aux dépens de leur sucre, et cette observation a été généralisée par M. Muntz. Les études sur les fermentations évoluèrent dans un sens proprement chimique, quand on eut découvert les ferments solubles, appelés *diastases* ou *enzymes*, qui sont les agents chimiques des phénomènes fermentatifs. Un des plus anciennement connus est l'invertine de M. Berthelot, qui transforme le sucre de canne en glucose et en lévulose; c'est un ferment hydrolysant et dédoublant, et la fermentation alcoolique du sucre de canne ne commence qu'après ce dédoublement. Les diastases sont très répandues dans les organismes tant animaux que végétaux. Elles sont élaborées par les cellules; dans cet ordre

d'idées, une découverte mémorable fut faite en 1897 par M. Büchner, celle de la diastase alcoolique. Celle-ci n'exsude pas d'elle-même de la cellule de levure de bière, et il n'a été possible de l'en extraire que par une très forte compression et au moyen d'une technique compliquée. Si dans la diastase ainsi obtenue, on met du sucre en poudre, on obtient de l'acide carbonique, et, en distillant, on trouve de l'alcool. La diastase alcoolique est susceptible de résister à une température de cent vingt degrés, fait exceptionnel, car les autres diastases perdent tout pouvoir à une température d'environ cent degrés.

Des ferments de même ordre, mais provoquant des oxydations, ont été découverts dans le suc de certaines plantes par M. G. Bertrand, qui a ainsi créé un nouveau chapitre de la physiologie cellulaire; il a mis en évidence une oxydase dans le latex de la laque de Chine, c'est-à-dire dans le suc laiteux de l'arbre à laque employé en Asie orientale pour le vernissage des meubles. Dans le latex, la laccase oxyde le laccol; elle peut oxyder d'autres phénols, en particulier l'hydroquinone. Diverses diastases oxydantes ont été depuis trouvées par MM. Bourquelot, Duclaux et d'autres chimistes.

La composition chimique des diastases est loin d'être connue, leur préparation à l'état pur et leur analyse étant pour ainsi dire impossibles. Quelques faits d'une extrême importance ont été cependant signalés. Dans la laccase, M. G. Bertrand a signalé le rôle prépondérant du manganèse, le pouvoir

oxydant d'une laccase variant comme sa teneur en manganèse. A la suite de ces études, M. Bertrand a été conduit à penser qu'il y a, dans un grand nombre de substances diastasiques, sinon dans toutes, une première substance active qui suffit à la rigueur à produire l'action considérée (le manganèse dans le cas de la laccase) et une seconde qui augmente sa vitesse de réaction (dans le même cas, la substance organique de la laccase, altérable par la chaleur).

L'exemple précédent de l'importance d'un élément minéral n'est pas unique; chaque diastase possède sa minéralisation propre et, sa minéralisation perdue, la substance reste inactive. Ainsi, la lipase, ferment des matières grasses, perd ses propriétés si on lui enlève son minéral qui est le sodium.

Parmi les plantes, les champignons se montrent surtout riches en diastases diverses. Non seulement on a mis en évidence tel ou tel ferment dans les organes des plantes, mais M. Guignard est arrivé, pour certains d'entre eux, comme la myrosine et l'émulsine, à préciser à l'aide de réactions microchimiques, leur localisation dans des cellules spéciales, ce qui a permis ensuite à divers observateurs de reconnaître le siège de la plupart des alcaloïdes retirés des plantes par des procédés chimiques.

Quels sont maintenant les modes d'action des diastases? On les a comparées aux actions catalytiques. Il y aurait ici bien des dictinctions à faire. Certaines fermentations constituent des réactions irréversibles. Dans ce cas, comme M. Berthelot l'a remar-

qué depuis longtemps, les ferments ne fournissent pas d'énergie aux substances qu'ils transforment ; ils jouent le rôle d'amorce pour les réactions irréversibles se produisant dans des éléments en équilibre peu stable. On peut comparer cette action à l'action décomposante énergique que possède le platine à l'état colloïdal sur l'eau oxygénée, comme l'a montré Bredig ; ce platine serait, en quelque sorte, un ferment inorganique, dont, chose très curieuse, certains poisons, comme l'hydrogène sulfuré, paralysent l'action. Les actions sont illimitées, et l'agent de la transformation se trouve à la fin de la réaction dans les mêmes conditions qu'au début. Il y a aussi des fermentations avec un caractère réversible. Un premier exemple d'une telle diastase a été donné par Croft Hill avec la maltase, qui tantôt hydrolyse le maltose en le transformant en glycose, tantôt déshydrate celui-ci en le ramenant à l'état de maltose. Pour ces ferments solubles, l'action est entravée par les produits de la réaction ; d'où des phénomènes réversibles d'équilibre. Il peut d'ailleurs se faire que le catalyseur se retrouve à la fin de la réaction sous sa forme primitive. Alors l'équilibre ne peut pas être modifié par la présence de ce catalyseur ; c'est un point qui a été quelquefois nié, mais que les recherches de Gibbs et de Le Châtelier ne laissent pas douteux. Le catalyseur influe sur les vitesses des réactions contraires, dont l'égalité produit l'équibre ; dans ces derniers temps, l'étude de ces vitesses des réactions diastasiques a fait l'objet des travaux de Victor Henri.

On voit assez, par ce qui précède, l'immense domaine que la chimie des enzymes doit exploiter et dans lequel la chimie organique synthétique trouvera certainement une abondante moisson. Mais nous ne pouvons insister; notre seul but ici était de montrer, par quelques exemples, les voies nouvelles où s'engage la chimie des êtres vivants, chimie tellement compliquée qu'on a pu croire longtemps qu'elle était différente de la chimie à laquelle on était habitué. Et je n'ai parlé que des *diastases*, mais voici qu'apparaissent les *antidiastases* s'opposant à l'œuvre des premières : telle l'antidiastase empêchant la présure de cailler le lait. Nous rejoignons ici les toxines et les antitoxines, dont il sera dit un mot dans le dernier chapitre de ce volume.

CHAPITRE VIII

Botanique et Zoologie.

I. La Botanique générale. — II. Les organismes inférieurs et les applications agronomiques. — III. La Zoologie et les idées d'évolution en biologie. — IV. Les doctrines transformistes. — V. La distribution des êtres vivants et la Paléontologie.

I

LA BOTANIQUE GÉNÉRALE

Les êtres vivants ont été partagés en végétaux et animaux : la classification s'offrait d'elle-même, mais la distinction est loin d'être aussi tranchée qu'elle l'a paru longtemps. Entre les végétaux et les animaux, il existe des termes de passage participant des propriétés des unes et des autres, de telle sorte qu'il y a comme un tronc commun à la base du règne végétal et du règne animal. En outre, l'attention des biologistes s'est particulièrement portée sur la cellule qui apparaît comme l'unité de matière

vivante, unité provisoire sans aucun doute, car elle est elle-même un élément extrêmement complexe, dont la complication apparaît de mieux en mieux, à mesure que l'on emploie des appareils plus parfaits d'observation et des réactifs plus précis d'analyse.

L'étude de la cellule végétale se trouvait en retard sur celle de la cellule animale, après l'avoir précédée. D'importants travaux sont venus combler cette lacune : ils sont relatifs aux communications protoplasmiques, aux centrosomes, au noyau, à la membrane cellulaire. Étendant ce que Thuret et M. Brunet avaient constaté jadis chez les floridées, on a pu reconnaître que, dans nombre de cas, les ponctuations des membranes cellulaires livrent passage à des fils protoplasmiques très ténus établissant des communications directes entre les cellules ; résultat important, en ce qu'il montre de nouveau que le corps de la plante n'est pas simplement un agrégat de cellules plus ou moins différenciées, mais bien un exemple vivant.

Outre le protoplasma, la cellule renferme, en général, un noyau. A côté de ce noyau, des corps spéciaux avaient été observés d'abord dans les cellules animales, par MM. Strassburger, van Beneden et d'autres naturalistes, et désignés sous le nom de *centrosomes*, corps qui paraissent jouer le rôle de centre dynamique dans la cellule. M. Guignard en annonça, en 1891, l'existence chez les plantes. C'est surtout chez les thallophytes que les centrosomes ont été le plus facilement observés, et on les a ren-

contrés aussi chez les algues et les fougères. Les caractères morphologiques de ces éléments sont très variables; de là, des discussions dont ils sont encore l'objet chez les plantes supérieures, où pourtant les faits observés conduisent aussi à admettre qu'il existe, au moment de la division du noyau, des centres cinétiques, dont le rôle est analogue à celui des centrosomes les mieux différenciés.

Le rôle du noyau est capital dans la vie de la cellule et dans les phénomènes de la fécondation. La présence de ce corps a été démontrée dans tous les groupes de végétaux, à l'exception, toutefois, des bactéries. On doit à M. Strassburger et à M. Guignard d'avoir mis en évidence la ressemblance frappante qui existe, dans les phénomènes de la division du noyau, à la fois chez les animaux et chez les plantes; ces savants ont constaté que, dans une même espèce, les noyaux des tissus végétatifs diffèrent, par un caractère important, des noyaux des cellules reproductrices. Cette différence porte sur le nombre des éléments chromatiques ou chromosomes, pendant la division indirecte ou karyokynèse; dans les noyaux des cellules sexuelles, ce nombre est réduit à la moitié du nombre observé dans les noyaux végétatifs. De plus, le nombre de chromosomes, qui peut offrir des variations dans les noyaux végétatifs, est remarquablement fixe dans les organes sexuels, fait probablement en relation avec la transmission des propriétés héréditaires. De plus, ce nombre est identique dans le noyau mâle et dans le noyau femelle qui s'unissent pour former

l'embryon. La réduction numérique du nombre des chromosomes dans les cellules sexuelles apparaît comme nécessaire, pour que ce nombre ne devienne pas double à chaque végétation.

Des découvertes considérables ont été faites également dans l'étude des organes reproducteurs chez les végétaux. Le mode de transport de l'élément mâle vers l'élément femelle, qu'il doit féconder, avait permis, depuis longtemps, d'établir une différence profonde entre les phanérogames et les cryptogames. Chez les cryptogames, il ne peut avoir lieu que par l'intermédiaire de l'eau, et les gamètes mâles ou anthérozoïdes sont pourvus de mouvements, grâce auxquels ils vont rejoindre le gamète femelle ou oosphère. Chez les phanérogames, au contraire, le grain de pollen forme un tube plus ou moins long, qui pénètre dans les tissus et permet au gamète mâle d'arriver au contact du gamète femelle. Cette distinction classique doit être abandonnée; en 1897, l'existence d'anthérozoïdes a été démontrée, presque simultanément, chez plusieurs phanérogames gymnospermes, notamment par M. Ikeno, dans une cycadée, et par M. Hirase, dans une conifère, le gingko. Chez ces plantes, le grain de pollen développe, comme chez les autres phanérogames, un tube pollinique, mais celui-ci n'atteint pas le sac embryonnaire; à son intérieur, prennent naissance deux anthérozoïdes qui s'en échappent. On peut donc voir là des types de transition entre les cryptogames supérieures et les autres gymnospermes dépourvues d'anthérozoïdes. Cette décou-

verte est d'autant plus intéressante que les cycadées actuelles et l'unique genre gingko sont les représentants de formes nombreuses de la période mésozoïque, qui ont fait leur apparition avec les autres gymnospermes encore vivantes.

Une découverte non moins importante est due aux travaux récents de M. Guignard et de M. Nawaschine. Ces deux observateurs ont montré, d'une façon indépendante, que, chez les angiospermes, l'ovule n'est pas simplement, comme on l'avait cru jusqu'ici, le siège d'une fécondation unique, donnant naissance à l'embryon qui constitue la partie essentielle de la graine : une seconde fécondation a lieu en même temps que la première et a pour conséquence la formation de l'albumen destiné à nourrir l'embryon. Les deux éléments mâles, amenés dans l'ovule par le tube pollinique, ont chacun un rôle déterminé : l'un s'unit au noyau de l'oosphère, l'autre au noyau secondaire. Ces deux copulations donnent naissance, d'une part à l'embryon, organisme définitif chargé de perpétuer l'espèce, d'autre part à l'albumen, tissu transitoire destiné à la nutrition de l'embryon. D'ailleurs, ces deux copulations ne sont pas semblables entièrement; les caractères de la sexualité, au point de vue de la réduction du nombre des chromosomes, n'existent que dans celle qui donne naissance à l'embryon, comme il résulte des observations de M. Guignard. La double fécondation permet de comprendre certains faits restés inexplicables chez les hybrides; on se rend compte, en effet, maintenant que l'hybridité peut porter

aussi bien sur l'albumen que sur l'embryon. Comme le fait remarquer M. H. de Vries, qui a spécialement étudié les hybrides du maïs : « Les expériences sur l'influence du pollen dans le croisement trouvent leur explication, vainement cherchée depuis plus d'un siècle, dans la remarquable découverte de la fécondation double, par M. Nawaschine et par M. Guignard. »

L'anatomie des tissus et des organes a donné lieu à de nombreux mémoires, parmi lesquels il faut citer les études de M. van Tieghem sur les racines. Elle a apporté aussi à la botanique systématique un secours des plus importants ; c'est ainsi que M. van Tieghem a revisé la classification d'un grand nombre de familles et montré combien étaient souvent insuffisants les caractères qui avaient servi à les établir, et l'illustre botaniste s'est efforcé d'édifier une classification basée sur la considération de l'œuf des plantes. En anatomie expérimentale, l'action du milieu sur la structure des plantes et les adaptations que celles-ci peuvent présenter dans les diverses conditions de végétations ont préoccupé nombre d'observateurs. L'influence du climat alpin, en particulier, a été étudiée par M. Bonnier, grâce à des cultures comparées à des altitudes différentes, dans le but de rechercher non seulement de quelle manière le milieu extérieur modifie les diverses fonctions, mais aussi de quelle façon la forme et la structure de l'organisme se trouvent elles-mêmes influencées. M. Bonnier a constaté aussi que la lumière électrique permet d'obtenir les mêmes effets

que la lumière solaire ; il a pu alors, avec la lumière électrique continue, réaliser des conditions suffisamment semblables à celles des contrées arctiques, et obtenir dans la structure des plantes les mêmes caractères que ceux qu'on observe naturellement dans les régions polaires.

Nous n'avons plus à revenir sur les progrès faits dans la connaissance des diastases, dont nous avons suffisamment parlé à propos de la chimie biologique. Les résultats obtenus dans l'étude de la chlorophylle sont loin d'être définitifs. La réduction de l'acide carbonique, s'effectuant dans les feuilles par l'intermédiaire de la chlorophylle, est une opération endothermique nécessitant l'intervention d'une énergie étrangère, qui est, comme on sait, l'énergie solaire. Les diverses radiations du spectre ne sont pas également efficaces pour cet objet; les bandes d'absorption d'une solution alcoolique de chlorophylle ont fait connaître la position dans le spectre des radiations actives dans l'assimilation chlorophyllienne, mais la question èst loin d'être épuisée. Il y a d'ailleurs plusieurs chlorophylles, comme l'a montré M. A. Gauthier, même dans une seule plante, et cette constatation pourrait rendre compte de la formation de principes immédiats divers se réalisant dans les feuilles. Ajoutons qu'il existe certains animaux contenant des grains de chlorophylle; pour quelques-uns, il y a là une symbiose avec une algue unicellulaire; il semble que pour d'autres, comme certains infusoires, la chlorophylle se trouve incorporée dans le protoplasma même.

Nous avons fait allusion dans le chapitre précédent au mécanisme possible de la synthèse des hydrates de carbone dans les feuilles, tel qu'il a été envisagé par Baeyer; il y aurait là une polymérisation avec perte d'eau de l'aldéhyde formique formé par l'union directe du carbone et de l'eau. Une preuve au moins théorique en est fournie par les travaux de Fisher, qui a obtenu synthétiquement certains sucres avec l'aldéhyde formique.

La pénétration et la sortie des gaz sur lesquels la plante exerce son action ou qui sont produits par elle, ont été élucidées par un certain nombre d'auteurs, par M. Mangin surtout, qui a montré le rôle prépondérant joué par les stomates. Les recherches de Bonnier et Mangin avaient établi que, dans l'action chlorophyllienne seule, isolée de la respiration, le dégagement d'oxygène surpasse toujours d'un cinquième au moins le volume de celui que renferme le gaz carbonique décomposé. Ce résultat, confirmé par les recherches de M. Schlœsing fils, amenait à rechercher dans la réduction des nitrates, mise en évidence par Schimper et d'autres auteurs, la cause de l'excès d'oxygène exhalé par les organismes verts soumis à l'influence de la lumière. Il n'est pas douteux que l'assimilation de l'azote minéral soit facilité par les radiations lumineuses. Toutefois, il existe une différence entre l'assimilation du carbone et celle des nitrates dans la nature des radiations efficaces, car, pour ce dernier phénomène, ce sont surtout les radiations violettes et ultra-violettes qui interviennent. Quant au mécanisme

intime de l'assimilation des composés azotés, il est encore peu connu; mais il semble qu'il y ait lieu de distinguer deux phases : la formation des substances azotées non protéiques (amides, ammoniaque), et ensuite la formation des matières albuminoïdes avec l'aide des composés précédents. D'après les idées d'Armand Gauthier, confirmées par les recherches de Treub, l'acide cyanhydrique semble être l'un des produits intérimaires de la synthèse des matières azotées.

Quoi qu'il en soit, la fonction chlorophyllienne, considérée uniquement par Boussingault comme la cause de la fixation du carbone, doit être entendue aujourd'hui dans un sens plus large, comme la fonction présidant à la synthèse des hydrates de carbone et des matières azotées.

Au point de vue de la nutrition carbonée, on a considéré longtemps qu'il y avait une opposition complète entre les plantes vertes et les végétaux sans chlorophylle, la totalité du carbone assimilé par les premières provenant du gaz carbonique, tandis que les seconds utilisent exclusivement les matières organiques. Il y avait là une erreur, et on sait aujourd'hui, que les plantes vertes ont la possibilité d'utiliser la nourriture organique.

Quoique bien spéciale en apparence, la question de la greffe végétale touche aux questions les plus élevées de la philosophie biologique. Un des résultats les plus saillants d'expériences récentes de Vöchting consiste en ce que toute cellule possède une polarité, je veux dire qu'elle a un haut et un bas, un

côté droit et un côté gauche, qui diffèrent entre eux au point de vue de la facilité avec laquelle elles peuvent se souder. L'union normale ne se fait bien qu'entre la face supérieure d'une cellule et la face inférieure d'une autre, entre la moitié droite et la moitié gauche. A un autre point de vue, M. Daniel a porté son attention sur les rapports et l'influence réciproque du sujet et du greffon; il a montré que l'opinion générale, d'après laquelle l'influence du sujet sur le greffon sera nulle, ce qui permet de reproduire et de conserver par la greffe une foule de variétés utiles, ne doit pas être admise dans un sens absolu. Si, en effet, cette influence ne se manifeste que rarement d'une façon directe, elle peut se faire sentir d'une façon indirecte sur la descendance de la plante greffée. Les graines fournies par celles-ci sont parfois capables de donner des plantes offrant des caractères nouveaux et ces caractères sont transmissibles par hérédité. La greffe semble donc pouvoir être employée dans certains cas pour obtenir des variétés ou des races nouvelles.

II

LES ORGANISMES INFÉRIEURS ET LES APPLICATIONS AGRONOMIQUES

L'étude des plantes et des animaux inférieurs a pris un développement considérable, quand on s'est rendu compte qu'on pouvait y trouver l'explication de bien des faits, vainement cherchée chez les êtres

d'organisation supérieure. L'intérêt de ces études s'est encore accru quand les travaux de Pasteur ont montré le rôle immense joué par certains organismes inférieurs. Aussi, les champignons sont-ils actuellement l'objet d'un grand nombre de travaux. Cette classe de plantes présente, d'ailleurs, au point de vue physiologique, une particularité intéressante, la plupart des champignons ressemblant aux animaux par le mécanisme intime de leur nutrition et ne pouvant, comme eux, utiliser directement l'énergie solaire ; ils vivent, par conséquent, aux dépens du carbone organique du sol ou du milieu qui leur sert de support; ils sont parasites ou saprophytes.

L'étude des champignons appelle l'attention sur l'un des plus hauts problèmes de la biologie, je veux parler du problème de l'espèce. Si l'histologie a fourni le moyen de mieux circonscrire cet embranchement et d'opérer maints remaniements dans les classifications, les données immédiates de l'observation sont souvent restées insuffisantes, parce qu'elles ne portaient que sur des fructifications imparfaites. Il a fallu entrer de plus en plus dans la voie des cultures, en partant de semences pures. Mais on s'est aperçu que la question du terrain est plus complexe que celle de la semence. Tandis que les phanérogames ont une évolution fixe et déploient leurs organes dans un ordre de succession régulière, dès qu'elles ont un terrain favorable, les champignons, au contraire, produisent, dans des milieux différents, des formes végétatives variées et des fructifications polymorphes, dont l'apparition

est livrée au hasard de la présence des milieux qui conviennent à chacune d'elles. Le milieu optimum, tel que l'avait conçu et réalisé Raulin, ne convient qu'à la manifestation d'une parties des propriétés d'une espèce; l'optimum varie, pour une même espèce, suivant qu'on envisage telle ou telle particularité, comme le poids de la récolte, l'activité de la fermentation, la formation d'un organe reproducteur. D'autre part, les classifications purement morphologiques peuvent être insuffisantes. Des travaux récents ont mis en évidence, dans certains cas, des différences nouvelles plus faciles à constater que les différences morphologiques. Des espèces, encore confondues par l'insuffisance de l'analyse morphologique, se séparent sur le terrain biologique. Ainsi, certaines urédinées hétéroïques ont un hôte commun sur lequel on ne parvient pas à les distinguer, mais se séparent sur le choix d'un second hôte. On comprend quelles difficultés il peut y avoir à établir la limite entre deux espèces sœurs et de simples races éthologiques.

Toutes ces études n'ont pas seulement un intérêt théorique; elles ont eu de grandes conséquences pratiques. L'industrie des fermentations sous toutes ses formes a été transformée, grâce à l'étude biologique des levures et d'autres champignons, et aux progrès de la chimie des ferments de ces végétaux. Nous parlerons plus loin des maladies de l'homme et des animaux produites par les bacilles qui appartiennent pour la plupart au groupe des champignons. L'étude des maladies des plantes a pris aussi un

grand essor, et dans les traités sur ce sujet, comme celui de M. Prillieux, les champignons prennent une place de plus en plus envahissante ; ces champignons parasites sont l'objet de recherches biologiques qui permettent aux praticiens de réaliser une prophylaxie rationnelle. Ils jouent, d'ailleurs, quelquefois un rôle inattendu, et, récemment, M. Noël Bernard était amené à découvrir que la germination des orchidées exige la présence d'un champignon parasite.

La fécondation est indubitable chez certains champignons inférieurs, mais on tenait les champignons supérieurs, ascomycètes ou basidiomycètes, comme dépourvus de sexualité. M. Dangeard vient d'établir, chez ces champignons, l'existence d'une karyogamie intracellulaire, qui est pour lui la reproduction sexuelle cherchée depuis si longtemps dans les champignons supérieurs.

L'histoire des algues n'est guère d'un moindre intérêt que celle des champignons ; leur extrême variété d'organisation a fourni aux histologistes et aux physiologistes d'inappréciables matériaux de recherches. Les études de Thuret et de Pringsheim, puis de de Bary, Bornet et Cohn, sont depuis longtemps classiques. Plus récemment, on a signalé des faits extrêmement intéressants au point de vue de la physiologie générale de la reproduction, et établi que l'alternance des générations, loin d'être invariable chez certaines algues, est déterminée par les conditions extérieures. Il a été aussi constaté que, chez certaines algues, la pénétration réciproque des

noyaux mâle et femelle se réalise parfois avec une extrême lenteur, la fusion des noyaux sexués n'ayant lieu qu'après un repos de plusieurs mois, au moment où l'œuf au repos va germer.

Le polymorphisme a été l'objet de nombreuses recherches, notamment de M. Sauvageau. Dans différents groupes d'algues, comme chez les bactéries, la plante est capable de s'adapter, dans une certaine mesure et promptement, aux conditions variables du milieu physico-chimique où elle vit; mais, jusqu'ici, on a toujours trouvé des limites à ce polymorphisme, et, si la notion d'espèce s'est trouvée étendue, elle n'a pas été profondément modifiée. Rappelons encore les symbioses entre algues et animaux, d'autant que les faits de parasitisme prennent aujourd'hui un intérêt considérable en biologie générale.

Les sciences agronomiques sont une application de la botanique; dans ce domaine, les trente dernières années ont vu des découvertes d'un intérêt considérable. MM. Schlœsin et Müntz, en découvrant le ferment nitrique, ont fait voir, il y a vingt ans, que la nutrition végétale est en rapport étroit avec quelques-uns des microorganismes qui évoluent dans les profondeurs du sol, mais on était alors loin de penser que l'union de la plante avec la bactérie peut, chez certaines espèces, se changer en une véritable symbiose profitable à la végétation. C'est qu'en effet la vie du ferment nitrique reste indépendante; partageant la besogne avec son congénère, le ferment nitreux, il se développe aussi bien dans les sols nus

que dans les terres cultivées, et M. Winodgradsky l'a vu se reproduire dans des milieux de nature exclusivement minérale, ce qui montre qu'il possède, comme les plantes à chlorophylle, la puissance d'assimiler le carbone de l'acide carbonique libre ou des carbonates, quoiqu'il soit incolore. En fait, il utilise pour cela l'énergie libérée par les réactions parallèles exothermiques qu'il est apte à mettre en train.

M. Berthelot avait reconnu, en 1886, que l'association de certains organismes aérobies avec les plantes de grande culture est favorable à celles-ci, en même temps qu'avantageuse pour le sol qui les porte : sous la seule influence apparente du temps, le sol s'enrichit peu à peu en azote, et d'autant plus qu'il nourrit une végétation plus active. Le gain est déjà sensible pour la terre nue, et il peut atteindre plusieurs centaines de kilogrammes par hectare et par an, pour une culture de légumineuses, par exemple la luzerne ; il cesse enfin de se produire quand la terre a été stérilisée par un chauffage préalable à cent dix degrés.

Ces résultats inattendus posaient encore une fois la grosse question de la fixation de l'azote gazeux, affirmée par Georges Ville, dès 1849. La discussion soulevée fut terminée par les expériences de MM. Hellriegel et Wilfarth, qui firent connaître le mécanisme à l'aide duquel les légumineuses fixent l'azote de l'air. Ces deux savants établirent que les nodosités des racines des légumineuses sont les organes nécessaires de cette fixation, qu'elles ne se

développent jamais dans un milieu biologiquement stérile, et apparaissent, au contraire, sûrement lorsqu'on ensemence ce milieu avec une trace de terre végétale chargée de germes microbiens.

Grâce à ces nodosités, les légumineuses peuvent se développer normalement, même en l'absence de tout aliment azoté; les céréales qui, elles, n'en portent pas, restent insensibles à l'ensemencement, et, dans aucun cas, n'arrivent à contenir plus d'azote que n'en renfermait le sol.

Il fut établi que les nodosités des légumineuses sont de véritables réceptacles d'une bactérie polyforme, le *Bacillus radicicola*, qu'il est possible de cultiver en bouillon, sans lui faire perdre sa faculté caractéristique d'absorber l'azote de l'air et de déterminer par ensemencement l'apparition de tubercules sur les racines des légumineuses.

L'amélioration du sol par les légumineuses tient donc à ce que les plantes fixent directement l'azote de l'air, dont une partie reste en terre après la récolte, sous forme de débris de toute nature. L'amélioration des prairies naturelles, ainsi que l'enrichissement progressif des sols dénudés dans lesquels le *Bacillus radicicola* reste en repos, doit avoir une autre origine : c'est encore à des organismes inférieurs qu'il faut l'attribuer. Il résulte des travaux de MM. Th. Schlœsing et Laurent que, en présence de certaines espèces microbiennes encore mal définies, les algues vulgaires fixent aussi l'azote atmosphérique, à ce point que, sur un sol pauvre, leur apparition influence favorablement les récoltes de gra-

minées. Enfin, M. Winogradsky a isolé de la terre une bactérie anaérobie qui, dans un milieu mal aéré, au contact d'autres espèces aérobies, absorbe l'azote gazeux, sans le concours des végétaux supérieurs.

Les enseignements qui ressortent de ces découvertes sont pour l'agriculture de tout premier ordre. Ils lui montrent que, pour améliorer la terre, il ne suffit pas, comme on le croyait autrefois, de lui donner une composition chimique convenable, par l'usage d'amendements ou d'engrais convenablement choisis, mais qu'il faut de plus faire d'elle un milieu de culture favorable à l'évolution des microbes créateurs ou modificateurs de la matière azotée : ils lui apprennent, en un mot, qu'il lui faudra désormais compter avec les infiniment petits et que l'absence de microbes dans la terre peut lui être aussi préjudiciable qu'un manque d'eau, de soleil ou d'engrais.

III

LA ZOOLOGIE ET LES IDÉES D'ÉVOLUTION EN BIOLOGIE

En zoologie, comme en botanique, les observateurs continuent, chaque jour, à compléter le répertoire des animaux. Les découvertes géographiques ont beaucoup contribué à cette extension de nos connaissances, et l'exploration des grandes profondeurs océaniques a amené au jour des animaux jusque-là inconnus.

Comme nous le disions tout à l'heure, pour toute une partie de la biologie, la distinction entre zoologie et botanique est sans objet. Ainsi, les recherches sur la division de la cellule concernent la biologie générale ; peut-être seulement sont-elles plus faciles sur les animaux que sur les plantes. Ces belles études sont surtout morphologiques; si, voulant aller plus loin, on se demande quelle est la cause actuelle de cette division, on entre dans un domaine bien obscur, où il faut se méfier des explications de mots. Il y a sans doute une action du noyau sur le cytoplasme. Les stimulus chimiques doivent jouer un rôle important; mais, à supposer même que l'on puisse mettre en évidence des diastases sécrétées par le noyau, dans quelle mesure aurait-on trouvé une explication de la division et de la différenciation cellulaires ? Nous avons indiqué plus haut que l'étude plus approfondie des diastases et des colloïdes pourra peut-être apporter un jour quelque lumière sur ces questions, ou au moins suggérer quelque image utile. En attendant, nous ne pouvons guère pénétrer dans les mécanismes intimes du développement des organismes. Aussi, ne doit-on pas s'étonner que, dans certaines théories zoologiques, la méthode soit autre que dans les théories physico-chimiques. Elle a un caractère comparatif, et, en quelque sorte, historique. Nous allons la voir à l'œuvre dans la doctrine de l'évolution, et son maniement demande des habitudes d'esprit quelque peu différentes de celles habituelles aux savants adonnés aux sciences qui sont entrées dans une

période plus mathématique, et où le stade purement qualitatif est, si je puis dire, depuis longtemps dépassé. On peut penser que c'est là un état provisoire, car l'expérimentation s'introduit chaque jour en botanique et en zoologie, les questions morphologiques et l'expérimentation physiologique pratiquée dans les conditions strictes des sciences physiques devenant de plus en plus connexes.

La biologie tout entière est aujourd'hui dominée par l'idée d'*évolution*, idée qui est, d'ailleurs, un ferment puissant dans d'autres domaines, comme la philosophie, l'histoire, la sociologie. Deux problèmes distincts s'y rattachent : d'abord, la question de l'évolution d'un organisme individuel, c'est-à-dire du cycle des apparences qu'il présente depuis son origine dans l'œuf jusqu'à sa mort, et, en second lieu, l'histoire au cours des âges des organismes si complexes que nous rencontrons dans le règne animal et dans le règne végétal. Ce sont, suivant l'expression de Hæckel, l'*ontogénie* et la *phylogénie*.

L'ontogénie, ou embryogénie générale, est seule accessible à une étude scientifique directe. C'est aujourd'hui une partie de la science d'une importance capitale : quelques-unes de ses conclusions sur le développement des êtres vivants paraissent définitivement acquises. L'embryogénie de la cellule, dont j'ai déjà parlé en botanique, a une grande part dans l'embryogénie générale. Les cellules constituant le corps d'un métazoaire se divisent de bonne heure en cellules somatiques et cellules gonadiales destinées à la reproduction, distinction qui se trouve chez

tous les animaux et végétaux. La réduction karyogamique, capitale parce qu'elle prépare la fécondation, a fait, comme nous l'avons dit, l'objet en zoologie, comme en botanique, d'un grand nombre de recherches concordantes ; peut-être une question reste-t-elle encore en suspens, c'est de savoir si cette réduction est seulement quantitative, ou si elle est en même temps qualitative, point qui n'est pas sans importance pour certaines théories de l'hérédité.

Dans l'étude de la formation des êtres aux dépens de l'œuf fécondé, la théorie des feuillets blastodermiques domine la morphologie pure. On peut rattacher la conception des feuillets blastodermiques au nom de Huxley, qui avait été frappé de la similitude générale de constitution de tous les métazoaires, et de de Blainville, qui disait déjà dans ses cours : « L'homme est un tube digestif retourné. » Les anatomistes étaient ainsi arrivés à l'homologie des feuillets chez les divers animaux ; c'étaient là, d'ailleurs, des analogies encore hypothétiques plutôt que de véritables homologies. Ces notions ont pu se préciser, grâce aux progrès de la cytologie, et les idées avancées par Huxley et de Blainville ont pu être vérifiées depuis, par suite des perfectionnements du microscope. On vit que, chez tous les êtres dont l'évolution est demeurée simple et explicite, il y avait un développement similaire ; c'est surtout à Kowaleski qu'on doit d'avoir montré, dans une série d'études sur des animaux de types très divers, qu'on rencontrait partout une même forme embryonnaire, désignée dès 1872 par Haeckel sous

le nom de *gastrula* : celle-ci a un ectoderme, un mésoderme et un endoderme, et forme le premier stade normal dans la différenciation. Des travaux sans nombre ont été effectués, dans toute la série animale, sur le développement de cette forme primitive. La théorie de la gastrula permet de voir comment les métazoaires ont pu se constituer morphologiquement; elle donne une base solide à l'anatomie comparée. Ainsi, chez les animaux supérieurs, l'ectoderme de l'embryon devient le tégument externe et tout ce qui en dérive; l'endoderme donne le tube digestif et ses annexes, ainsi que le poumon; le mésoderme donne les muscles, les vaisseaux, les séreuses. Quelques objections ont bien été élevées contre la théorie générale de la gastrula. Une des plus importantes a été tirée de l'embryologie des éponges, mais il semble n'y avoir dans ces difficultés qu'une question d'interprétation sur la valeur donnée à la position topographique des feuillets.

L'étude approfondie du développement des organismes a révélé des faits extrêmement curieux. D'une façon générale et en gros, la ligne d'évolution d'un type organique est constante, mais il y a des cas où il en est autrement. Dans une même espèce aussi peu variable que possible à l'état adulte, on rencontre parfois des formes embryonnaires très différentes les unes des autres, lorsqu'on étudie le développement des embryons en divers points de l'habitat de l'espèce considérée ou dans des milieux différents : ce sont les cas que Giard, qui les a

étudiés d'une manière très suivie, désigne sous le nom de *pœcilogonie*. Ainsi, certains crustacés, identiques à l'état adulte, offrent un développement différent suivant qu'ils vivent dans l'eau douce ou dans l'eau salée. Tous ces faits d'évolution plus ou moins condensée, sur lesquels Giard et M. Perrier ont appelé vivement l'attention, sont des plus importants pour l'embryogénie comparée, en même temps qu'ils apportent une preuve de la modification par les conditions extérieures. Ils se rattachent à une autre particularité non moins remarquable, la progénèse, cas dans lequel la reproduction sexuée se fait d'une façon plus ou moins prématurée, et qui rend plus compréhensibles les curieux phénomènes désignés autrefois sous le nom de générations alternantes. Que de faits importants seraient encore à citer, comme, par exemple, les phénomènes de castration parasitaire, magistralement étudiés par Giard, qu'entraîne dans l'organisme d'un être vivant la présence d'un parasite agissant directement ou indirectement sur la fonction génitale de son hôte.

L'expérimentation, avons-nous dit plus haut, s'introduit de plus en plus en zoologie. D'un grand intérêt à cet égard sont les expériences de M. Boveri et de M. Delage sur la fécondation mérogonique, où une portion d'œuf sans noyau se montre susceptible d'être fécondée. Mais il faut citer surtout les expériences si curieuses de M. Lœb et de ceux qui l'ont suivi sur la parthénogénèse. L'éminent physiologiste de San-Francisco a montré le premier en 1899 la possibilité de faire évoluer des œufs non fécondés

d'oursin jusqu'à des stades avancés sous l'influence de l'excitation de solutions salines, de telle sorte que dans ces mémorables expériences l'action du spermatozoïde est remplacée par celle de diverses dissolutions. Les premières solutions employées étaient des solutions de chlorure de potassium et de chlorure de magnésium. Lœb avait d'abord pensé que la pression osmotique joue seule un rôle dans le phénomène, mais il reconnut ensuite l'importance du métal. Delage s'est servi de l'acide carbonique pour produire le développement des œufs vierges d'Asterias glacialis; il les plonge, pendant l'expulsion des globules polaires, dans de l'eau de mer chargée d'acide carbonique, et arrête ainsi la maturation, puis replaçant ensuite les œufs dans l'eau de mer ordinaire, il voit le développement commencer régulièrement et se continuer presque jusqu'à la métamorphose. Il s'en faut que le déterminisme de tous ces phénomènes soit bien précisé, et les interprétations sont très nombreuses. Giard a insisté sur l'importance de l'anhydrobiose (c'est-à-dire sur le ralentissement des phénomènes vitaux sous l'influence de la déshydratation progressive), suivie d'une hydratation pendant laquelle les phénomènes vitaux sont augmentés, ce qui peut amener alors la parthénogénèse. Dans les premières expériences de parthénogénèse artificielle, les ovules traités ne formaient pas de membrane, et la larve avait une vitalité moindre que dans le cas de la fécondation par un spermatozoïde; dans des expériences ultérieures, Lœb est arrivé à des résultats beaucoup plus com-

plets en plongeant l'œuf vierge dans une solution marine d'éther acétique après le traitement par une solution saline. Il semble qu'on puisse arriver à obtenir artificiellement des conditions équivalentes (quoique non identiques apparemment) à celles que réalise la pénétration du spermatozoïde. Quoi qu'il en soit, les célèbres expériences commencées par Lœb et continuées par Delage et un grand nombre de biologistes donnent un nouvel essor aux tentatives de théories physico-chimiques de la vie, en cherchant à éclairer le déterminisme physico-chimique d'un des *mystères* les plus profonds que nous offre la nature vivante, celui de la fécondation.

Les expériences de Delage méritent une mention particulière. Il a pu élever deux oursins parthénogénétiques jusqu'à un âge qu'on peut regarder comme avancé. Ils provenaient l'un et l'autre d'expériences à l'acide chlorhydrique et à l'ammoniaque. Les Pluteus issus de ces œufs se sont transformés au bout de deux mois environ, et ils ont régulièrement grandi jusqu'à leur mort, c'est-à-dire pendant seize mois. Cette mort parait due à un empoisonnement provoqué par une cause inconnue, mais les deux individus étaient normalement constitués. L'un d'eux était certainement mâle, et c'est là une constatation intéressante.

Il y a d'ailleurs tout lieu de penser que les expériences de parthénogénèse se trouvent parfois réalisées dans la nature; il y a des cas connus de parthénogénèse naturelle chez les échinodermes, et ces cas semblent limités à des habitats où les eaux sont char-

gées de certains sels. On doit encore, quoiqu'il s'agisse d'animaux différents, rattacher à l'ordre d'idées suggéré par les expériences de Lœb des recherches récentes sur le cycle évolutif des Infusoires, en particulier sur la Paramécie. Après un certain nombre de générations agames scissipares, les infusoires manifestent, comme on le sait depuis Maupas, une dégénérescence et meurent si la conjugaison n'intervient pas. Or, on peut obtenir le rajeunissement en transportant pendant quelque temps la Paramécie vieillissante dans un milieu convenable, et ce traitement a pu être pratiqué plusieurs fois. Heureuses Paramécies, pour lesquelles on a trouvé une eau de Jouvence!

IV

LES DOCTRINES TRANSFORMISTES

Si l'*ontogénie* est accessible à une étude scientifique directe, il n'en est pas de même de la *phylogénie*, du moins si l'on pose le problème phylogénique dans toute sa généralité. Les observations des zoologistes, complétées par les données de la paléontologie, ont démontré de la manière la plus nette la plasticité d'un grand nombre d'espèces. Ces variations ont donné à penser que toutes les espèces vivant actuellement proviennent d'une souche commune. Une telle hypothèse prise dans sa généralité n'est évidemment pas susceptible d'une véritable démonstration; elle joue dans la biologie moderne le rôle de

postulat et constitue une théorie extrêmement féconde, qui est devenue un admirable instrument de recherche et de travail. La théorie de la descendance, comme toutes les théories vraiment utiles, permet de relier les faits épars; elle rend compte de détails d'organisation et de développements et permet même d'en apercevoir de nouveaux. En poursuivant le but probablement chimérique de dresser l'arbre généalogique des animaux et des plantes, le naturaliste moderne, guidé par l'idée de l'évolution, est conduit à étudier l'action des milieux et à séparer ce qui, dans le développement, revient à ceux-ci, et ce qui est l'héritage d'ancêtres disparus.

La théorie transformiste a pour elle qu'on ne peut concevoir une autre théorie scientifique qui la remplacerait utilement. A la vérité, on pourrait être tenté de faire les remarques suivantes un peu décourageantes. Nous ignorons absolument les conditions favorables dans lesquelles la matière a pu s'organiser et devenir vivante. Sans doute, dans les conditions expérimentales actuellement réalisables par nous, la génération dite spontanée est impossible; mais dans la succession des âges géologiques ces conditions favorables ont pu se trouver réalisées, non pas seulement une fois, mais un grand nombre de fois. Les souches initiales, dira-t-on, peuvent donc être en grand nombre, et c'est un vain effort de dresser les grands arbres généalogiques que nous voyons maintenant dans les traités, et sur lesquels les zoologistes sont loin d'être d'accord. Certaines observations montrent que cette argumentation

renferme quelque part de vérité et que des filiations diverses sont possibles, comme il arrive pour la formation des genres *Equus* et *Rhinocéros* en Amérique et en Europe. Mais un tel point de vue renfermant trop d'intermination, les biologistes ne s'y sont encore guère arrêtés, suivant d'abord les conséquences des hypothèses les plus simples; cependant quelques paléontologistes, comme M. Depéret, cherchent dans leurs travaux à se placer à un point de vue plus général.

Lamarck, le vrai fondateur longtemps méconnu de la théorie de la descendance, avait autrefois insisté sur un des facteurs primaires de l'évolution, l'usage, et sur l'hérédité des effets acquis par l'usage. Au nom de Darwin se rattachent surtout les facteurs secondaires, la sélection naturelle, par laquelle se fixent les variations, et la concurrence vitale; ce n'est qu'avec une extrême réserve que le grand naturaliste anglais a abordé l'action des milieux. Peu des biologistes attachent aujourd'hui à la sélection naturelle l'importance que lui attribuait Darwin; elle est un processus conservateur et accélérateur, mais non édificateur. L'antagonisme subsiste cependant encore entre *néo-lamarckiens* et *néo-Darwiniens;* certains naturalistes nient l'hérédité des caractères acquis, et il en est, comme Weismann, qui complètent la sélection des variations accidentelles par une théorie de la continuité du plasma germinatif.

La liste est longue, telle que la donne Giard, des facteurs primaires, directs ou indirects, de l'évolu-

tion et des facteurs secondaires. Tout en tenant compte de l'action des causes extérieures sur l'avenir d'un être, on ne doit pas, semble-t-il, méconnaître une prédétermination réelle, celle-ci pouvant être rattachée, dans une certaine mesure, aux causes actuelles, mais ayant agi antérieurement et déterminant dans l'œuf les conditions dans lesquelles il évolue : ce sont ces virtualités que nous désignons sous le terme vague d'*hérédité*.

Le mot d'hérédité est déjà venu sous ma plume plusieurs fois à propos de Mécanique, et j'ai eu l'occasion de dire que les mécaniciens, dans les phénomènes mécaniques avec hérédité, se plaçaient à deux points de vue : pour les uns, l'hérédité mécanique n'étant qu'apparente, tandis qu'elle est réelle pour les autres. J'oserai risquer une comparaison, peut-être un peu boiteuse comme beaucoup de comparaisons; les premiers sont à rapprocher des néo-Darwiniens et les seconds des néo-Lamarckiens.

Quoi qu'il en soit, des mécanismes intimes du transformisme, c'est de l'embryogénie, et de la paléontologie que les naturalistes tirent les preuves positives les plus fortes de l'évolution des êtres vivants. De bonne heure, l'attention fut appelée sur le perfectionnement progressif des êtres rencontrés dans les différents étages géologiques, quand on part des périodes les plus anciennes. C'est ainsi que, pour les végétaux, on voit successivement apparaître les végétaux inférieurs, les cryptogames vasculaires, puis les phanérogames, gymnospermes et

angiospermes, et parmi ces derniers les monocotyledones et les icotyledones. Il en est de même du monde animal, où, au moins dans les grandes lignes, les êtres présentent, avec le temps, un degré croissant de différenciation. Quelque inexactes qu'aient pu être parfois les idées et les interprétations émises au sujet du mot *progrès*, on doit reconnaître un perfectionnement, qui a pu subir des régressions, mais dont le sens, à prendre les moyennes, est toujours resté le même. Une étude approfondie a montré des difficultés dont on ne s'était pas d'abord avisé; mais on a réussi souvent à en donner des explications par des interprétations plus précises de la théorie de la descendance, particulièrement en cherchant à se rendre compte de l'influence des milieux. Il est à peine besoin de citer des exemples de cette évolution progressive des êtres vivants; un des plus caractéristiques est offert par les reptiles et les oiseaux, réunis les uns aux autres par les reptiles volants, les premiers oiseaux étant pourvus de dents comme les reptiles. Nous reviendrons, tout à l'heure, sur quelques récents travaux paléontologiques.

Nous avons parlé, plus haut, de l'ontogénie ou embryogénie générale. Avant d'arriver à l'état adulte, l'animal passe par une série de formes, et, d'après la loi de *Serres* et de *Fritz Muller*, ces formes sont la répétition des formes ancestrales par lesquelles a passé l'espèce : c'est ce qu'on a exprimé en disant que *l'ontogénie répète la philogénie*. Il peut y avoir, d'ailleurs, dans ce processus

des accélérations ou même des lacunes. La loi de Serres a donné l'explication de bien des singularités, comme les organes rudimentaires présentés par certains animaux à l'état embryonnaire et même conservés à l'état adulte. On sait, par exemple, que le perroquet actuel possède à l'état embryonnaire des dents qu'il ne possède plus à la naissance. Il y a, dans toutes les classes du règne animal un ensemble de causes accélératrices des phénomènes embryogéniques; c'est à cet ensemble de causes qu'Edmond Perrier donne le nom de *Tachygenèse.* Pour pouvoir parler d'accélération embryogénique, il faut nécessairement une ontogénie, *regardée comme normale*, avec laquelle on puisse faire la comparaison et *il y a là une difficulté énorme* qui peut rendre illusoire la loi de Serres. Perrier pense retrouver une telle ontogénie, présentant en quelque sorte le maximum de lenteur, dans les formes inférieures de chaque classe du règne animal, et c'est ainsi qu'il classe les faits embryogéniques essentiels.

Quand on pense à la transformation des espèces, on a presque toujours en vue une évolution très lente, et on compte, pour cela, sur la longue durée des temps géologiques. En fait, il se pourrait que, au moins à de certains moments, les choses se soient passées tout autrement. C'est ce que tendent à montrer les récentes expériences de M. Hugo de Vries, qui a obtenu des résultats extrêmement remarquables dans la culture de certaines Œnothera. Des types nouveaux se sont montrés subitement,

sans intermédiaires ni préliminaires, et sept espèces d'Œnothera ont été ainsi produites. Il n'est pas douteux que ces variations *brusques* sont relatives à nos moyens d'observation; si nous pouvions entrer dans le détail du mécanisme vital, si, pour reprendre une expression dont nous nous sommes bien des fois servis, nous pouvions apercevoir, non seulement les variables *apparentes*, mais aussi les variables *cachées*, nous trouverions vraisemblablement une continuité dans la transformation, mais avec une énorme accélération pour certaines variables, à un moment donné. On formulerait, de la manière suivante, le résultat essentiel des expériences de M. de Vries : il peut arriver qu'une espèce paraisse varier, en général, avec une extrême lenteur, mais qu'*à certains moments critiques de la vie de l'espèce*, la variation prenne une accélération énorme; une nouvelle espèce semble alors se produire *brusquement*. Ainsi, les variations d'une espèce à une autre ont pu, dans le temps, être très rapides, et alors on est moins étonné de l'absence de certains types intermédiaires dans la succession des terrains géologiques; c'est là un point sur lequel nous reviendrons en paléontologie.

Ces vues générales sur la *mutation* sont sans doute appelées à un très grand avenir. C'est dans cette voie féconde que les recherches relatives au transformisme doivent être poursuivies; on pourra y trouver une démonstration expérimentale du principe de la descendance. Rien, en tout cas, ne peut frapper davantage l'attention de tout esprit

philosophique que l'apparition soudaine d'espèces nouvelles. Peut-être arrivera-t-on à trouver des conditions expérimentales mettant une plante dans cet état d'*affolement* précédant les variations brusques ; c'est ce qu'autorisent à penser les expériences de M. Blaringhem relatives à l'action des traumatismes sur la variation et l'hérédité.

Dans le règne animal des recherches ont été faites sur les mutations évolutives de certains crustacés, à la suite d'une hypothèse émise par M. Bouvier. On a surpris, en quelque sorte, à l'île de la Réunion, une mutation d'un genre de Crevette en un autre. Les deux genres de crevettes *Atya* et *Ortmannia* se distinguent, l'un de l'autre, par des caractères essentiels dont l'un porte sur la forme des pinces. M. Bordage a trouvé des femelles d'Ortmannia, qui ont donné naissance à des jeunes Ortmannia et à de jeunes Atya; il semble bien qu'en ce moment le genre Ortmannia se trouve à la Réunion dans cet état instable nécessaire pour la mutation.

Quant à la reconstitution généalogique des animaux et des plantes, qu'on trouve aujourd'hui dans les travaux de la nouvelle école embryogénique, elle est très utile, pourvu que l'on n'ait pas la prétention d'affirmer que ces arbres sont l'expression exacte de la vérité; ils sont surtout intéressants quand on les limite à certains groupes bien définis du règne animal. Dans cette tentative, rendue déjà si difficile par l'insuffisance des données paléontologiques, un obstacle considérable surgit à chaque instant : je veux parler de la *convergence* des

espèces, fait remarquable sur lequel ont insisté de nombreux naturalistes, parmi lesquels Giard et Karl Vogt, consistant en ce que des types phylogénétiquement séparés deviennent, grâce à certaines influences biologiques, entièrement semblables dans leur apparence extérieure. Mais, nous l'avons déjà dit, si le but est quelque peu chimérique, il conduit à une méthode de travail d'une merveilleuse fécondité, et l'idée d'évolution domine aujourd'hui toutes les sciences biologiques.

On a pu voir, par ce qui précède, combien nous avions raison de dire plus haut que la méthode était actuellement différente en physico-chimie et dans certaines parties de la biologie, et demandait des qualités d'esprit différentes de celles du physico-chimiste. Les êtres vivants, certes, sont soumis aux lois physico-chimiques, et leur étude est par là du domaine des physiciens et des chimistes : mais ils subissent, à tout instant, et ont subi, à travers la série indéfinie des générations dont ils descendent, l'action variable des agents extérieurs. Les espèces sont plus ou moins malléables; elles subissent l'action des milieux depuis un temps plus ou moins long. Enfin, l'hérédité a fixé, à des degrés différents aussi, les caractères déterminés par les agents physico-chimiques. Ces données, essentiellement biologiques, des problèmes relatifs à l'action des agents physico-chimiques sur les êtres vivants, opposent à leurs solutions d'immenses difficultés.

V

LA DISTRIBUTION DES ÊTRES VIVANTS ET LA PALÉONTOLOGIE

Sous l'influence de l'idée d'évolution, des études qui n'étaient autrefois que de simples objets de curiosité, ont pris une importance considérable. Telle est l'étude de la distribution géographique des êtres vivants, où on peut aller chercher des documents pour ou contre la parenté présumée de telles ou telles formes d'animaux et de végétaux.

Dans le monde animal, les grandes explorations sous-marines effectuées depuis vingt ans ont conduit à des résultats remarquables. « Les récoltes réalisées, dit M. Edmond Perrier, qui a fait de cette question une étude approfondie, ont dépassé tout ce que l'imagination pouvait rêver. Une multitude de formes nouvelles ont été ajoutées aux listes déjà si longues des zoologistes; ce sont, en général, des formes spéciales, apparentées tout aussi bien aux espèces actuelles qu'aux espèces anciennes, alliées à beaucoup de nos formes littorales, mais ayant leur cachet particulier, portant l'empreinte de leur étrange existence et constituant un ensemble que l'on a justement caractérisé du nom de *faune des abîmes*.

A son tour, depuis vingt ans environ, la géographie botanique est entrée dans une voie nouvelle; elle est sortie de son état d'indécision pour prendre les allures d'une science établie, avec un programme nettement défini. Il fallait coordonner les faits

innombrables accumulés par des voyageurs. Les uns ont mis en relief les rapports de la végétation avec le milieu et le climat, d'autres se sont occupés de l'aire de dispersion des espèces et des différents groupes : d'autres, enfin, ont abordé le problème du développement des végétaux à travers les âges. En particulier, la botanique écologique, c'est-à-dire la botanique traitant des rapports qui existent entre les organismes et le monde extérieur, cherche à déterminer comment les plantes subissent l'influence des forces extérieures, de la température, de la lumière, des aliments, etc., et comment elles y adaptent leurs formes. Le traité de M. Warming et le magistral ouvrage de M. Schimper tiennent une place considérable dans l'œuvre de ces trente dernières années. Une phalange de botanistes ont abandonné leurs laboratoires pour demander aux pays lointains de nouveaux sujets d'études, et, en quelques années, leurs observations ont fourni à la physiologie expérimentale une foule de faits nouveaux qu'elle soumet à son contrôle et qu'elle cherche à expliquer. Ainsi, pour prendre un exemple, les observations de M. Bonnier et de M. Flahaut, en Scandinavie, et les cultures de M. Bonnier dans les Alpes, ont précisé les relations des plantes arctiques et alpines avec les climats sous lesquels elles vivent; des faits, comme la transformation, sous l'influence des climats polaires, d'une espèce annuelle en une espèce bisannuelle, et de celle-ci en une espèce vivace, sont d'une haute portée.

De la phytogéographie à la botanique fossile, la

transition est immédiate. Comme le disait déjà de Candolle, la géographie botanique doit avoir pour but principal de montrer ce qui, dans la distribution actuelle des végétaux, peut s'expliquer par les conditions actuelles des climats et ce qui dépend des conditions antérieures. La question est serrée de plus en plus près à mesure que des données plus anciennes et plus nombreuses sont fournies par la paléobotanique. Celle-ci s'est notablement développée depuis quinze ans, et quelques résultats généraux doivent être notés.

La présence d'un microbe dans le terrain houiller de Saint-Étienne avait été signalée autrefois par M. van Tieghem; on doit à M. Bernard Renault une étude approfondie des bactériacées fossiles qui se montrent en abondance dans presque tous les débris organiques fossiles. Ainsi qu'on devait s'y attendre, on retrouve, dans les combustibles fossiles eux-mêmes, des bactériacées en abondance, et M. Renault pense qu'elles ont été les agents de la transformation en houille ou en lignite. Les travaux de M. Zeiller sur les végétaux des périodes paléozoïques et secondaires, ont apporté une importante contribution à la botanique fossile; quelques-uns ont résolu des questions controversées sur certains caractères distinctifs entre les cryptogames vasculaires et les gymnospermes, question dont l'intérêt s'étend à la botanique générale. Le savant paléontologiste a publié, il y a quelques années, un traité de botanique fossile qui donne l'état actuel de cette partie de la science. On doit, naturellement, chercher à

dégager les renseignements que les observations actuellement acquises sont susceptibles de fournir sur le problème des liens génériques qui peuvent exister entre les divers types végétaux qui se sont succédés à la surface du globe. Il paraît ressortir d'un examen attentif que les groupes principaux du règne végétal, embranchements et classes, et dans chaque classe, les groupes génériques se sont montrés dès les époques les plus anciennes. Cependant certains types éteints, s'intercalant entre ceux que nous observons aujourd'hui, viennent augmenter le nombre des termes de la série, et établissent parfois des liaisons entre des groupes aujourd'hui bien tranchés; c'est ainsi qu'il semble exister des intermédiaires entre les fougères et les cycadinées. Par contre, tout indice de filiation nous échappe en ce qui concerne les angiospermes. On peut dire, d'une manière générale, avec M. Zeiller, que l'on constate actuellement l'existence de séries plus ou moins discontinues, à termes assez rapprochés, pour que l'on doive conclure à une évolution progressive, mais dans laquelle les modifications se seraient le plus souvent opérées assez rapidement pour que nous ne puissions pas les saisir sur le fait. Il n'y a pas lieu d'être étonné de cette conclusion, si on se rappelle ce que nous avons dit plus haut des variations brusques en signalant les expériences de M. H. de Vries sur les mutations. D'ailleurs, M. Grand'Eury a signalé récemment les mutations de quelques plantes fossiles du terrain houiller. Il semble que, pendant l'énorme durée des temps car-

bonifères, plusieurs espèces soient restées permanentes pendant de longues périodes, subissant seulement à certains moments des transformations rapides.

Les conclusions auxquelles nous venons d'arriver en paléontologie végétale s'appliquent, dans une large mesure, à la paléontologie animale. Ici d'ailleurs, l'abondance des documents est bien autrement considérable. D'importantes trouvailles ont été faites, qui sont venues combler plusieurs lacunes. Chez les vertébrés, on doit signaler particulièrement les reptiles pareiasauriens du permien du nord de la Russie, identiques avec ceux de l'Afrique australe et recueillis avec les débris de la même flore. D'autre part, depuis trente ans, les descriptions des dinosauriens se sont multipliées; on connaît les iguanodons de Bernissart, qui excitent, au musée de Bruxelles, la stupéfaction du public et l'admiration des naturalistes; mais ce sont surtout les dépôts secondaires des Montagnes Rocheuses aux États-Unis qui fournissent les débris les plus complets et les plus nombreux de dinosauriens. Ils ont été étudiés par Marsh et M. Cope, et on peut voir, au musée de New-York, une merveilleuse collection de ces étranges reptiles, dont le port est parfois celui des mammifères, et dont quelques-uns se rapprochent des oiseaux par leurs caractères ostéologiques. Certains d'entre eux étaient gigantesques, comme l'Atlantosaurus, dont Marsh estime la longueur à plus de 35 mètres, et le Brontosaurus, dont le squelette complètement connu a une longueur de 20 mètres.

Nos connaissances se sont aussi augmentées sur les faunes qui ont vécu jadis en Patagonie; les mammifères de cette partie de l'Amérique ont, au point de vue évolutif et phylogénique une réelle importance. Les découvertes récentes faites principalement par C. et F. Ameghino, nous ont révélé, dans cette région australe, un centre de dispersion prodigieusement riche et tout à fait indépendant des autres centres déjà connus de mammifères fossiles. L'âge de ces faunes tertiaires de Patagonie est encore un sujet de discussion entre les géologues, les uns les faisant débuter avec le Crétacé supérieur, d'autres seulement avec l'Éocène plus ou moins récent. On les a partagées en quatre groupes, le dernier correspondant au Pliocène, renfermant seul des types de l'Amérique du Nord et établissant que vers la fin des temps tertiaires une communication s'est établie entre les deux Amériques sur l'emplacement de l'isthme de Panama.

Les vertébrés fossiles, dont on tente de belles restitutions, attirent surtout l'attention du public; non moins utiles à bien des égards, sont, pour le géologue, les restes des invertébrés. Un résultat remarquable de ces vingt dernières années est la découverte, dans les régions himalayenne, indienne et sibérienne, de riches faunes de céphalopodes faisant connaître les types marins d'étages (houiller, permien, trias) qui n'étaient guère connus en Europe que par leurs types continentaux. La connaissance de l'évolution de ces mollusques dibranchiaux y a beaucoup gagné en précision, et on peut mainte-

nant suivre avec sûreté toutes les phases du développement de la grande famille des ammonoïdés, si précieuse pour la classification rigoureuse des étages, depuis le Dévonien jusqu'à la fin des temps secondaires; les recherches de M. Munier-Chalmas et de M. Douvillé sur les loges et les cloisons des ammonites, sont dans cette question d'un haut intérêt. M. Douvillé a insisté sur la valeur variable des fossiles pour l'étude des enchaînements du règne animal. Ceux qui évoluent rapidement sont, suivant son expression, de *bons fossiles*; ils permettent d'apprécier des intervalles de courte durée. D'autres évoluant beaucoup moins rapidement et persistant sans modifications appréciables pendant une ou plusieurs périodes géologiques, sont de *mauvais fossiles*; ceux-ci correspondent sans doute à des espèces qui se sont transformées brusquement, au sens où nous l'entendions tout à l'heure en parlant des Œnothera de de Vries. Parmi les premiers, on peut citer les ammonites avec leurs cloisons si caractéristiques et les rudistes, puis aussi à partir de l'époque secondaire, les vertébrés, dont dans des ouvrages magistraux M. Albert Gaudry nous a retracé les enchaînements, que l'on peut suivre au Muséum d'Histoire naturelle dans l'admirable galerie qui fait si grand honneur à la Paléontologie française.

M. Depéret a essayé de reconstituer les *rameaux phylétiques* de plusieurs familles importantes d'ongulés tertiaires; il a montré que chacun de ces groupes constituait généralement, non pas une série unique, mais un véritable faisceau de rameaux

indépendants, se développant parallèlement et par mutations graduelles à travers les étages géologiques, sans contacts ni passages d'un rameau à un autre. Leur vitesse d'évolution est d'ailleurs variable, et elle est généralement en raison inverse de leur longévité. Une des lois les plus curieuses de l'évolution des rameaux est celle de l'augmentation de la taille depuis les petites formes du début de chaque rameau jusqu'aux formes géantes par lesquelles il se termine. Une autre loi non moins curieuse, d'après M. Depéret, est celle de la spécialisation progressive des rameaux phylétiques. Contrairement à la théorie darwinienne, *la spécialisation, loin d'être une cause de prospérité et de longue durée des rameaux, est une marque de déchéance qui annonce et précède de peu leur extinction.*

J'ai dit, en parlant des mutations, pourquoi il était probable que certains types de transition ne pourraient jamais être découverts. Il faut, au reste, dans ces questions, apporter une grande prudence, et les migrations peuvent avoir joué un rôle très important, comme l'avait déjà dit Cuvier. M. Depéret a beaucoup insisté sur ce point, en ce qui concerne les mammifères tertiaires ; il y a eu des changements de faunes par voie de migration. Une autre question se pose aussi en paléontologie, et il n'en est pas de plus captivante : elle est relative au moment des premières apparitions de la vie à la surface de la terre.

Le monde silurien est déjà un monde très évolué, où se rencontrent des céphalopodes, des crustacés

et des poissons. Au-dessous du Silurien se trouve le terrain désigné sous le nom de Cambrien, caractérisé par certains genres de trilobites différents de ceux du Silurien, et dont quelques-uns sont aveugles. Outre un genre spécial de trilobites, l'Olenellus, le Cambrien inférieur a donné des éponges, des échinodermes, et de nombreux brachiopodes dont une famille, celle des lingules, a traversé sans modifications la série des âges zoologiques et existe encore aujourd'hui, ce qui est un fait bien digne de remarque. Le Cambrien inférieur renferme aussi des mollusques, et même parmi ceux-ci des céphalopodes représentés par des nautilidés, et aussi des arthropodes marins. Par contre, on n'a jamais rencontré de vertébrés dans les terrains cambriens.

Mais descendons plus bas encore. Nous avons au-dessous du Cambrien les terrains précambriens ou huroniens, qui, en France, sont représentés dans notre Bretagne. Ici les fossiles sont rares, à cause du métamorphisme subi par ces terrains; toutefois, en certains endroits, ils nous ont encore livré des traces de radiolaires, des débris de crinoïdes rencontrés par M. Barrois en Bretagne. Mais on peut aller plus bas encore, et y rencontrer des débris fossiles incontestables; c'est ce qui est arrivé dans la contrée des *canyons* de l'Ouest américain, particulièrement dans les canyons du Colorado, où on a trouvé des colonies d'Hydroïdes et des mollusques. Dans le Montana, les terrains précambriens contiennent, outre des trilobites, des Gigantostracées, mollusques de grande taille. Nous avons beau descendre; toujours

se présentent à nous des animaux singulièrement évolués. L'origine de la vie recule de plus en plus; mais le métamorphisme, subi par les terrains archéens que nous rencontrons maintenant ne nous laisse guère d'espoir de remonter plus avant dans l'histoire de la vie sur notre planète.

Remontons, avant de finir ce chapitre, toute la série des âges géologiques jusqu'aux temps quaternaires où ont été trouvés les plus anciens fossiles humains. Dans une grotte située près de La Chapelle-aux-Saints (Corrèze) on a trouvé récemment des ossements humains du type de Néanderthal et de Spy. Mais tandis que dans ces dernières localités quelques contestations avaient pu s'élever sur la nature des terrains, aucune hésitation n'est possible en Corrèze où nous avons affaire au pléistocène moyen, c'est-à-dire à l'âge du Mammouth des paléontologistes ou à l'époque moustérienne des archéologues préhistoriques. Par l'ensemble de ses caractères étudiés avec grand soin par M. Boule, l'homme de La Chapelle-aux-Saints se rapproche beaucoup plus des singes anthropoïdes qu'aucun autre type humain. Morphologiquement, il paraît se placer entre le pithécantrophe trouvé il y a quinze ans à Java et les races actuelles les plus inférieures. On n'a rencontré jusqu'ici aucun fossile humain dans le pléistocène inférieur ou chelléen, dans lequel se trouvent tant de restes de l'activité humaine, et l'homme tertiaire a des partisans de moins en moins nombreux parmi les anthropologistes.

CHAPITRE IX

La Médecine et les théories microbiennes.

S'il est une partie de la science se trouvant actuellement dans une transformation complète, et qui soit à un véritable tournant de son histoire, c'est assurément la médecine. Non pas que l'observation clinique doive être suivie avec moins de soin que par le passé; elle sera toujours essentielle pour le médecin qui doit analyser les symptômes morbides permettant d'établir sûrement un diagnostic par leur groupement et leur évolution. Nulle part peut-être, depuis quarante ans, l'analyse de ces symptômes n'a été poussée plus loin qu'en neuro-pathologie; elle amena en particulier la découverte des lésions systématiques du système nerveux; mais la médecine clinique, art en même temps que science, ne peut rentrer dans le cadre de ce livre. Dans ce court chapitre final, nous indiquerons seulement quelques applications à la médecine des études microbiennes et de celles qui en dérivent.

Sous l'influence des progrès de la physiologie, la médecine, peu à peu, a cessé de se confiner uniquement dans l'observation, et les faits observés ont suggéré des expériences, quelquefois sur l'homme, le plus souvent sur les animaux. C'est ainsi que la médecine a été naturellement conduite à devenir expérimentale, et on peut rattacher surtout à cette transformation le nom de Claude Bernard, dont un beau livre a précisément pour titre : *La Médecine expérimentale.* Une des plus importantes découvertes du grand physiologiste est celle des sécrétions internes dont le rôle apparaît, de plus, considérable, soit pour la constitution du sang, soit pour l'établissement d'une sorte de solidarité humorale entre toutes les parties de l'organisme ; l'exemple le plus remarquable que l'on puisse citer des sécrétions internes est la formation des matières sucrées qui a lieu dans le foie. Quelques-unes des sécrétions internes sont sans doute à rapprocher des ferments solubles sécrétés par les cellules, des ptomaïnes et leucomaïnes, toxines et antitoxines, sur lesquels les recherches de M. Armand Gautier et de M. Bouchard appelèrent d'abord l'attention, et qui font aujourd'hui l'objet de tant de travaux. A un point de vue pratique, on se rappelle les tentatives de Brown-Séquard et celles de plusieurs de ses élèves, pour fonder une opothérapie ; seule l'opothérapie thyroïdienne s'est montrée d'une réelle efficacité dans le cas du goître et du crétinisme.

La transformation de la médecine, commencée sous l'influence des physiologistes, s'est prodigieu-

sement accélérée à la suite des incomparables découvertes de Pasteur. Les études microbiologiques ont alors envahi toute une partie de la médecine. A la place d'entités morbides et de mots souvent vides de sens, apparurent des organismes microscopiques, véritables causes de la maladie, d'autant que, dans ce qu'on pourrait appeler l'âge d'or des découvertes pastoriennes, on ne vit que le microbe, laissant ainsi de côté une moitié du problème. Comme il arrive souvent dans toute étude nouvelle et féconde, après l'âge héroïque où tout paraît simple, les difficultés se présentèrent. Il fallut tenir compte de la résistance de l'organisme contre l'agent infectieux; on dut chercher à l'expliquer, ainsi que les phénomènes d'immunité que venait de découvrir Pasteur, sous peine de rentrer dans la phraséologie tant reprochée à la médecine d'autrefois. C'est à quoi on travaille depuis plus de vingt ans avec une merveilleuse ardeur : les faits nouveaux s'accumulent, des explications au moins partielles s'ébauchent, et la nosologie, les conceptions étiologiques, la thérapeutique se trouvent transformées.

Nous avons déjà vu plus haut le rôle important des bactéries en chimie, en botanique et en agronomie; nous devons maintenant dire un mot des maladies infectieuses et des doctrines qui se sont développées à la suite des découvertes de Pasteur. Dès le début, une difficulté se présente relativement au polymorphisme des microbes. Parmi les microbiologistes, les uns se prononcent pour la spéci-

ficité absolue. Pour d'autres, les espèces microbiennes ne sont pas aussi nettement délimitées; le bacille tuberculeux, par exemple, existe sous plusieurs formes différentes par leur virulence vis-à-vis de certains animaux, et on connaît aussi une série de bacilles pseudodiphtériques. Il est probable que ce sont là seulement des variétés d'une même espèce.

Passons rapidement en revue quelques maladies infectieuses. Le microbe du choléra et celui de la tuberculose ont été découverts par M. Koch en 1882. Lors de l'épidémie de Hambourg, en 1892, on a découvert dans l'eau une série de microbes ressemblant beaucoup aux vibrions cholériques; en cultivant ce vibrion dans l'eau peptonisée, on a obtenu sa toxine, c'est-à-dire le poison qu'il sécrète. Le microbe de la peste fut découvert, en 1894, par M. Yersin : c'est un bâtonnet court et ovale, doué de motilité, assez semblable à celui du choléra des poules. Pour la diphtérie, MM. Roux et Yersin ont fait en 1889, l'étude complète du poison diphtérique, à la suite de laquelle M. Behring a découvert la sérothérapie diphtérique appelée à un si grand avenir et dont MM. Richet et Héricourt avaient antérieurement posé le principe. Le bacille du tétanos a été décrit pour la première fois par M. Nicolaier, en 1885, et M. Kitasato a fait une étude approfondie de la redoutable toxine sécrétée par ce microbe. Le microbe de la lèpre a été découvert en 1870 par le médecin norvégien Hansen, mais on n'a pas jusqu'ici réussi à le cultiver; ce bacille

a une grande affinité pour le tissu nerveux, et les conditions de sa vitalité paraissent très étroites. Rien de net ne se dégage des nombreuses études faites sur le cancer; plusieurs théories sont en présence, théorie coccidienne, théorie blastomycétienne, d'après laquelle il y aurait une levure pathogène, et enfin théorie de la spécificité cellulaire faisant résulter le cancer d'une évolution anormale des cellules de l'organisme.

Il y a des maladies à caractère infectieux, qui sont certainement microbiennes, mais dont on n'a pu trouver le microbe tant qu'on a opéré dans les conditions ordinaires avec le microscope. Pour deux d'entre elles, en se servant des perfectionnements apportés dans l'emploi du microscope, et dont nous avons dit précédemment un mot, il a été possible d'apercevoir le microbe. Tel est le microbe de la péripneumonie des bêtes à cornes, signalé par MM. Cotton et Mouton; tel est aussi le microbe de la fièvre aphteuse. La rage et la variole sont sans doute des maladies à microbes encore invisibles pour nous; après les conquêtes précédentes dans la visibilité, il y a lieu d'espérer qu'on pourra quelque jour démontrer avec précision leur existence.

Les microbes bactériens, que l'on s'accorde à ranger parmi les végétaux et spécialement les champignons, ne sont pas les seuls êtres produisant les maladies infectieuses. Il y a, parmi les sporozoaires, qui sont des petits animaux microscopiques et unicellulaires, et particulièrement parmi les grégarines et les coccidies, des agents de maladies redou-

tables. Tel est l'hématozoaire de Laveran, qui est l'agent pathogène du paludisme, endémie dont l'empire est immense, qui constitue le principal obstacle à l'acclimatement des Européens dans la plupart des pays chauds. Rien n'est plus curieux que le cycle évolutif de l'hématozoaire du paludisme, tel qu'il résulte des travaux de Laveran, de Grassi, de Ross et de plusieurs autres. L'hématozoaire partage son existence entre les globules rouges du sang de l'homme et l'intestin d'un moustique du genre anophèles. Introduit dans la sang humain par la piqûre de ce moustique, il se fixe dans le globule rouge et a alors l'apparence d'une petite masse sphérique. Au bout d'un temps déterminé, qui correspond à la période de la fièvre, pendant lequel il a détruit le globule sanguin ou hématie, il se segmente, se répand dans le sang et va se fixer dans d'autres hématies. Cette succession de phénomènes se continue pendant un certain temps, mais ces générations agames s'épuisent, et, à un certain moment, on voit apparaître des formes sexuées, mâles et femelles. Toutefois, leur conjugaison n'est pas possible dans le sang humain, et, si une circonstance particulière ne se produit, ces éléments meurent sans laisser de postérité. La circonstance en question est la piqûre par un nouveau moustique, qui fera pénétrer ainsi dans son intestin les formes mâles et femelles dont il vient d'être question. Dans ces nouvelles conditions, la conjugaison sera possible, et nous revenons à la forme initiale de l'hématozoaire, qu'une nouvelle piqûre pourra introduire

dans l'organisme humain. On comprend que la connaissance complète des transformations de l'agent infectieux ait permis d'instituer une prophylaxie rationnelle du paludisme. C'est ainsi qu'on a pu faire disparaître le paludisme de la région du canal de Suez.

Il est une autre maladie redoutable dans le développement de laquelle un moustique joue un rôle essentiel : c'est la fièvre jaune. Son microorganisme, jusqu'ici invisible, est un parasite du plasma sanguin accomplissant une partie de son évolution dans un moustique différent de celui du paludisme, et qui, heureusement pour nos climats, a besoin d'une température suffisamment élevée.

D'autres agents de maladies redoutables sont encore des sporozoaires comme les trypanosomes de maladies variées chez l'homme et les animaux. La maladie du sommeil, qui semble prendre un grand développement, est causée par un trypanosome se développant dans l'intestin de la mouche tsé-tsé. Le triponema pallidum, spirochète découvert par Schaudinn, est l'agent de la syphilis.

Je parlais tout à l'heure de l'âge héroïque des théories microbiennes ; c'était, il y a trente ans, quand Pasteur découvrait la vaccination expérimentale par l'injection des cultures microbiennes atténuées. Pasteur expliquait d'abord l'immunité acquise en supposant que le microbe appauvrit le milieu en y vivant ; il pensa plus tard que le microbe pouvait sécréter des produits qui lui sont nuisibles, doctrine que professait de son coté M. Chauveau. La théorie

des sérums bactéricides et celle des sérums antitoxiques se fonda alors à la suite des travaux de MM. Bouchard et Charrin, de M. Behring et de bien d'autres. Parallèlement, se developpait une doctrine des plus remarquables, relative à la résistance de l'organisme, la théorie phagocytaire. Dejà, depuis longtemps, Virchow avait vu que, dans la plupart des maladies infectieuses, il y surabondance de leucocytes; seulement il leur attribuait un rôle néfaste. Cohneim, depuis, avait identifié les globules du pus et les leucocytes, et M. Koch avait constaté que, chez la grenouille, les globules entourent la bactéridie charbonneuse. On a vu plus tard que les microbes ne pénètrent pas d'eux-mêmes dans les cellules amiboïdes; ils sont englobés, et c'est en cela que consiste la *phagocytose*, acte de défense naturelle de l'organisme, auquel restera attaché le nom de Metchnikoff. Chez les vertébrés, il y a des phagocytes libres et des phagocytes fixes. Parmi les phagocytes libres, on doit distinguer les globules polynucléaires, les plus nombreux chez l'homme, et les globules mononucléaires.

Les phagocytes fixes sont, entre autres, les cellules de la pulpe splénique, de la moelle des os, des ganglions lymphatiques. Les phagocytes libres ont une sensibilité très dévoleppée pour la composition chimique du milieu; c'est ce qu'on appelle la chimiotaxie, qui est positive ou négative suivant qu'il y a attraction ou répulsion. Les mononucléaires et les phagocytes fixes sont surtout macrophages, ils détruisent les éléments morts; les polynucléaires

sont des microphages destructeurs de microbes. Dans des maladies très aiguës, il y a peu de phagocytes libres, il y a au contraire une phagocytose très intense dans les maladies chroniques, et plus encore dans les maladies bénignes. Il est rare qu'un microbe, qui a pu être englobé, ne soit pas détruit, mais cela arrive pourtant, par exemple pour le bacille de la tuberculose. Une objection grave a été faite à la phagocytose, envisagée comme protection de l'organisme : c'est que les microbes ne peuvent être englobés qu'après avoir été privés de leurs pouvoirs toxigènes par une action antitoxique extra-cellulaire. On a répondu que les phagocytes peuvent, au contraire, englober non seulement les microbes, mais des toxines et des poisons minéraux. Pour M. Metschnikoff, l'immunité naturelle et l'immunité acquise s'expliquent par la phagocytose, et le phénomène le plus général dans l'immunité consiste dans une réaction phagocytaire. On se heurte encore à bien des difficultés, ici comme d'ailleurs dans les théories humorales, quand on veut descendre au détail, et on est parfois obligé de raisonner sur des sécrétions cellulaires plus ou moins hypothétiques. Quoi qu'il en soit, ces diverses doctrines renferment certainement une part de vérité, et le problème capital de la résistance de l'organisme est chaque jour serré de plus près.

De tout cela ressort suffisamment l'importance que prennent les toxines, qui sont du type de ces ferments solubles désignés sous le nom de diastases, dont nous avons déjà donné de nombreux exemples.

L'étude des toxines et des antitoxines est d'ailleurs plus difficile encore que celle des diastases rencontrées plus haut, car avec les toxines les réactifs sont seulement les troubles plus ou moins graves produits sur les animaux, et l'interprétation des expériences est singulièrement délicate.

La complication grandit sans cesse dans ces études ; à côté de certains ferments, il y a leurs complémentaires, les premiers n'étant capables d'agir qu'autant qu'ils sont aidés dans leur action par d'autres ferments ; telle est la trypsine contenue dans le suc pancréatique, qui n'est capable d'hydrolyser l'albumine que si une autre substance, l'entérokinase, sécrétée par la muqueuse duodénale, vient ajouter son action.

Nous avons dit qu'à certaines diastases s'opposent des antidiastases, comme aux toxines s'opposent les antitoxines. Il semble d'une manière générale que chaque ferment a son antiferment, qu'on appelle quelquefois un anticorps. On a observé que l'injection d'une diastase provoque la formation d'une antidiastase, qui est l'anticorps de la diastase. Les anticorps ont d'abord été invoqués pour l'interprétation des faits remarquables découverts par Bordet, relatifs à l'action des sérums de différentes espèces les uns sur les autres. Avec ces composés si complexes, qui se trouvent en si petite quantité, dont on ne sait rien jusqu'ici en dehors de certaines actions physiologiques, la physiologie et la chimie biologique ont une œuvre immense à accomplir après l'étude des infiniment petits organisés, comme

les microbes, elles doivent s'occuper de l'étude des substances chimiques jouant un rôle énorme, à dose infinitésimale. On voit dans quel sens la science a évolué depuis le temps de Pasteur. De tous cotés surgissent, dans cette partie de la médecine qui a son point de départ dans ses immortels travaux, des faits inattendus et des idées nouvelles. Les progrès accomplis depuis vingt ans autorisent des espérances pour ainsi dire illimitées.

Parmi les conquêtes de ces dernières années, une des plus remarquables et des plus troublantes est celle de l'anaphylaxie due à M. Charles Richet. L'anaphylaxie signifie le contraire de la protection. Le mot a été employé en 1902 par M. Charles Richet pour désigner la curieuse propriété que possèdent certains poisons d'augmenter, au lieu de diminuer, la sensibilité de leur organisme à leur action. Une substance insuffisante à tuer ou même à rendre malade un animal normal, détermine des accidents foudroyants et mortels chez un animal qui, longtemps auparavant, avait reçu cette même substance. Ces deux éléments : sensibilité plus grande à un poison par l'injection antérieure de ce même poison, et période d'incubation nécessaire pour que cet état de sensibilité plus grande se produise, constituent les deux conditions essentielles et suffisantes de l'anaphylaxie. Jusqu'à présent, les substances albuminoïdes colloïdales se sont montrées capables de provoquer l'anaphylaxie ; tel par exemple le poison extrait des actinies avec lequel M. Charles Richet a précisément découvert l'anaphylaxie. Pour

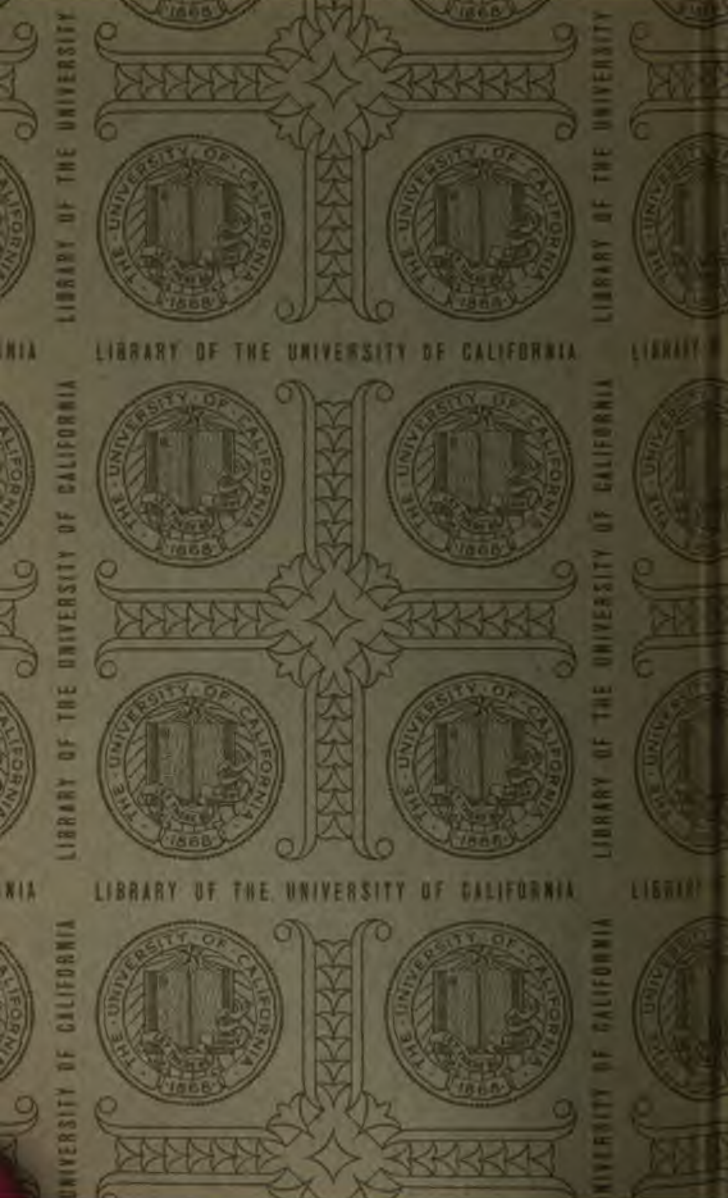
un animal, le sérum d'une autre espèce peut produire les phénomènes que nous étudions; on comprend l'importance énorme de ce fait pour la sérothérapie, qui peut alors devenir très dangereuse en produisant des chocs anaphylaxiques. Nous ne pouvons entrer ici dans les théories émises à ce sujet, ni dans les moyens proposés pour éviter l'anaphylaxie, mais on comprend assez, par ce qui précède, que la découverte de M. Richet est une des plus grandes découvertes de la physiologie actuelle.

FIN

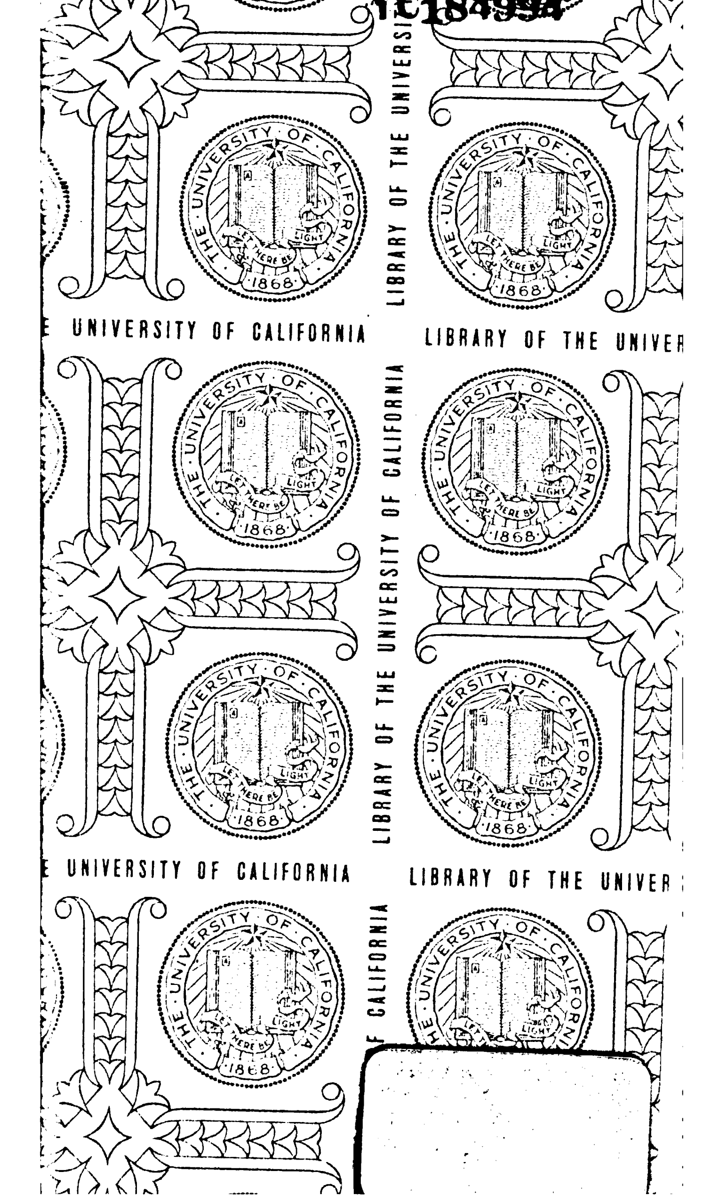
TABLE DES MATIÈRES

6598-3-21 — Paris. — Imp. Hemmerlé, Petit et Cie.





LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA
THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA 1868


LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA
UNIVERSITY OF CALIFORNIA
LIBRARY OF THE UNIVER
THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA
LET THERE BE LIGHT
1868

